УДК 005.5:378:574
UDC 005.5:378:574
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-016-030

МОНІТОРИНГ НАБУТИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ ЗДОБУВАЧАМИ ВИЩОЇ ОСВІТИ В НАЦІОНАЛЬНОМУ ТРАНСПОРТНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ СТОСОВНО ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

MONITORING OF ACQUIRED COMPETENCES BY HIGHER EDUCATION STUDENTS IN NATIONAL TRANSPORT UNIVERSITY RELATION TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



Харченко Анна Миколаївна, *доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном,*
e-mail: anna-x3@ukr.net, тел. +380442807909, Україна, 01010, м. Київ, вул Омеляновича-Павленка, 1, к. 323,

https://orcid.org/0000-0001-8166-6389



Хрутьба Вікторія Олександрівна, *доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища,*
e-mail: viktoriia.khrutba@gmail.com

https://orcid.org/0000-0002-8121-2042



Добровольська Анна Михайлівна, *кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри «Транспортного права та логістики", e-mail: anet_chechet@ukr.net, тел. +380634321538,*

https://orcid.org/0000-0002-5912-0678



Артемчук Юлія Володимирівна, *Національний транспортний університет, кафедра транспортних систем та безпеки дорожнього руху, Київ, Україна, асистент, e-mail: art_julia@i.ua, тел.: +380636047172,*

https://orcid.org/0000-0002-3872-7745

Анотація. Стаття присвячена розгляду важливого питання сьогодення – аналізу результатів моніторингу набутих компетентностей здобувачами вищої освіти стосовно цілей сталого розвитку в Національному транспортному університеті, який було проведено в 2024 році в рамках участі університету в проєкті «Network of Transformational Learning to Ensure the Sustainability of Assistance to Ukrainian Higher Education in Ensuring a Sustainable and Powerful Restoration of (post-war) Ukraine». Моніторинг охопив 215 здобувачів вищої освіти університету. За результатами опитування було виявлено спектр різноманітних та неоднозначних думок здобувачів щодо сталого розвитку, а також визначено відмінності в пріоритетах в залежності від освітньої програми, встановлено необхідність

застосування комплексного підходу до впровадження сталого розвитку в освітній процес. Було з'ясовано, що значний відсоток здобувачів освіти знаходиться на стадії вивчення концепції сталого розвитку та зацікавлені в цьому питанні, проте існує потреба у розробленні заходів з розтлумачення практичних аспектів стосовно їх персонального залучення. Респонденти визнали пріоритетність врахування аспектів сталого розвитку в освітньому процесі, втім з'ясовано, що їм не вистачає практичних знань та інструментів для втілення своїх набутих компетентностей у життя, що визначає важливість ролі університету у сприянні сталому розвитку та потребу у врахуванні результатів даного моніторингу при черговому оновленні освітніх програм. Визначено, що пріоритетними цілями закладу вищої освіти в цьому напрямку мають бути: розробка програми заходів з інформування учасників освітнього процесу, запровадження концепції інформаційної підтримки здобувачів вищої освіти, посилення пріоритетів університету щодо екологічності, енергоефективності та соціальної відповідальності, розробка заходів з інтеграції концепції сталого розвитку в освітні програми, розробка програми розвитку компетентностей здобувачів, адаптація освітніх програм до концепції повоєнної відбудови країни.

Ключові слова: моніторинг, сталий розвиток, освітній процес, цілі сталого розвитку, освітні програми, здобувачі вищої освіти.

Вступ. У 2019 Генеральна Асамблея ООН прийняла резолюцію, яка закликає міжнародне співтовариство розширити масштаби освіти в інтересах сталого розвитку для досягнення цілей Порядку денного на період до 2030 року [1]. Цілі сталого розвитку (ЦСР), також відомі як Глобальні цілі, були прийняті Організацією Об'єднаних Націй у 2015 році як універсальний заклик до дій щодо подолання бідності, захисту планети, забезпечення стабільності й процвітання націй до 2030 року.

Наукова спільнота у світі останнім часом приділяє значну увагу питанням забезпечення необхідними компетентностями здобувачів вищої освіти під час навчання в університетах [2, 3, 4]. Зокрема, наприклад у роботі [4] було проведено масштабний бібліометричний аналіз 871 публікації (535 документів у Scopus та 336 у Web of Science) з 1998 по 2019 рік, який підтвердив швидке зростання інтересу дослідників до питання інтеграції цілей сталого розвитку у вищу освіту. На основі результатів аналізу відображення цілей сталого розвитку в освітніх програмах в дослідженні [3] було зроблено висновок, що студенти можуть здобути мінімальні знання та навички, необхідні для реагування та сприяння сталому розвитку економіки країни, під час навчання в університеті, а значна кількість викладачів визнає важливість відображення цілей сталого розвитку у своїх предметах. У дослідженні [2] наголошувалося, що для забезпечення студентів закладів вищої освіти компетентностями в контексті сталого розвитку необхідно провести аналіз (моніторинг) освітніх компонентів, з'ясувати напрямки, шляхи та необхідність коригування дисциплін. Крім того, у 2024 році в Україні було оновлено «Положення про акредитацію освітніх програм, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти» [5], де враховано у критерії 2 (підкритерій 2.9) вимоги до забезпечення освітньою програмою набуття здобувачами вищої освіти компетенстностей стосовно досягнення цілей сталого розвитку [6]. Тому моніторинг набуття таких компетентностей здобувачами вищої освіти є актуальним завданням у сучасних умовах.

Національний транспортний університет з 2023 року приймає участь в міжнародному проєкті «Network of Transformational Learning to Ensure the Sustainability of Assistance to Ukrainian Higher Education in Ensuring a Sustainable and Powerful Restoration of (post-war) Ukraine», в рамках якого вже відбувався моніторинг освітніх програм університету [7]. В результаті проведеного дослідження було визначено, що, на думку гарантів, освітні програми технічного та економічного спрямування мають низьку відповідність цілям сталого розвитку, також існує потреба в урізноманітненні вибіркових дисциплін, оновленні правової бази освітнього процесу та врахування в дисциплінах питань щодо відновлення України у повоєнний період.

Проте опитування гарантів – це лише один з аспектів врахування думок внутрішніх стейкхолдерів університету. Беручи до уваги прагнення України до використання принципів

студентоцентричного навчання в освіті, постає необхідність зважати на позиції здобувачів вищої освіти стосовно врахування цілей сталого розвитку при оновленні освітніх програм.

Таким чином, метою моніторингу набутих компетентностей здобувачами вищої освіти стосовно цілей сталого розвитку є з'ясування обізнаності та зацікавленості студентів Національного транспортного університету сталим розвитком, а також визначення прогалин у сфері сталості викладання та навчання, розроблення заходів щодо удосконалення освітніх програм.

Виклад основного матеріалу.

В рамках проєкту «Network of Transformational Learning to Ensure the Sustainability of Assistance to Ukrainian Higher Education in Ensuring a Sustainable and Powerful Restoration of (post-war) Ukraine» у 2024 році було проведено опитування серед студентів Національного транспортного університету. Форма опитування була створена за допомогою сервісу Google Forms. Фокус-група налічувала 215 здобувачів освіти різних типів освітніх програм (рис. 1).

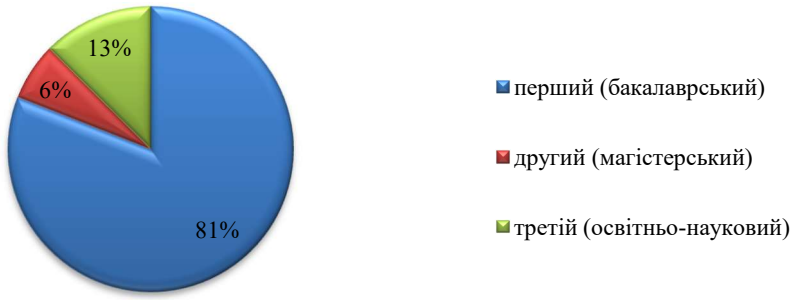


Рисунок 1 – Розподіл здобувачів вищої освіти, які прийняли участь в опитуванні, за рівнями навчання
Figure 1 – Distribution of higher education applicants who participated in the survey by level of education

З 215 здобувачів освіти, які прийняли участь в опитуванні, 81% склали представники освітніх програм першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, 6 % – другого (магістерського) рівня, 13% – третього (освітньо-наукового) рівня. Зокрема, в опитуванні прийняли участь здобувачі освітньо-професійних та освітньо-наукових програм «Екологія», «Менеджмент природоохоронної діяльності», «Логістика», «Менеджмент зовнішньоекономічної діяльності», «Менеджмент організацій та адміністрування (транспортний менеджмент)», «Екологічна інженерія автотранспортної діяльності», «Технології захисту навколишнього середовища на автозаправних комплексах та підприємствах будівельної індустрії», «Системний аналіз в транспортному будівництві», «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів», «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів», «Аеропорти, аеродромні конструкції та споруди», «Мости і транспортні тунелі», «Автомобільний транспорт», «Автомобільні транспортні засоби», «Транспортні технології та управління на автомобільному транспорті», «Організація міжнародних перевезень», «Транспортно-логістичні системи вантажних автомобільних перевезень», «Транспортна логістика міста», «Інтелектуальні системи управління дорожнім рухом», «Розумний транспорт і логістика для міст», «Міжнародний туризм», «Туризм», «Фінанси, банківська справа та страхування», «Облік і оподаткування», «Маркетинг послуг», «Цифрові технології обліку».

Респондентам було задано 12 запитань:

1) Зазначте 3-4 ключові слова, які Ви асоціюєте зі сталістю (сталим розвитком).

2) Зазначте своє особисте ставлення до сталого розвитку.

3) Які саме з 17 цілей є найбільш пріоритетнішими для Вашої професійної діяльності?

4) Чи має Ваш університет стратегію сталого розвитку або будь-який відповідний документ, який визначає його зусилля щодо сталого розвитку?

5) Якщо відповідь на Q.4 позитивна, будь ласка, вкажіть напрямок стратегії.

6) Чи потрібні Вам компетентності сталого розвитку, інтегровані в освітню програму, на якій Ви навчаєтесь?

7) Як концепція сталого розвитку повинна бути інтегрована в освітню програму, на якій Ви навчаєтесь?

8) Які з наведених нижче компетентності, що стосуються сталого розвитку, є важливим, на Вашу думку, у сучасних умовах?

9) Які перешкоди Ви вважаєте визначальними для впровадження сталого розвитку в освітній процес?

10) Чи надає освітня програма, за якою Ви навчаєтесь, необхідні компетентності для забезпечення повоєнної відбудови України на засадах сталого розвитку?

11) Чи хотіли б Ви, щоб у Вашу освітню програму/модуль були введені нові дисципліни (курси), пов'язані з повоєнною відбудовою України на засадах сталого розвитку?

12) Як навчання в університеті змінило Вашу поведінку з точки зору сталого розвитку?

Важливим аспектом опитування здобувачів освіти було визначення так званих «ключових слів», які вони асоціюють зі сталістю (сталим розвитком), що в подальшому зможе допомогти їм зрозуміти практичну застосовуваність цілей та навчити перетворювати знання на дії. Здобувачі освіти надали широкий спектр слів, які описують їх розуміння цього питання. Зокрема, найчастіше ними згадувалися наступні:

- Розвиток, що підкреслює динамічний характер сталого розвитку, постійний процес вдосконалення та прогресу.
- Ефективність, яка фокусується на оптимальному використанні ресурсів та мінімізації негативного впливу на довкілля.
- Стійкість, що підкреслює здатність системи витримувати виклики та зміни, зберігаючи свої основні функції.
- Інновації, які підкреслюють важливість нових технологій та рішень для досягнення сталого розвитку.
- Прогрес, який описує рух уперед, позитивні зміни та покращення якості життя.
- Здорове довкілля, яке фокусується на збереженні та відновленні екосистем, що є важливою умовою сталого розвитку.
- Майбутнє, що підкреслює довгострокову спрямованість сталого розвитку, його орієнтацію на потреби майбутніх поколінь.
- Екологія, що описує науку про взаємодію живих організмів з навколишнім середовищем, яка є важливою основою для сталого розвитку.
- Ресурси, які фокусуються на раціональному використанні природних ресурсів та переході до відновлюваних джерел енергії.
- Відновлюваність, що підкреслює важливість використання ресурсів, які можуть бути відновлені природним чином.
- Адаптивність, яка описує здатність системи пристосовуватися до нових умов та викликів.
- Ефективне використання ресурсів, що фокусується на мінімізації відходів та оптимізації ресурсоспоживання.
- Соціальна відповідальність, яка підкреслює важливість етичного ведення бізнесу та урахування соціальних наслідків діяльності.
- Інклюзивність, що описує прагнення до створення суспільства, де всі люди мають рівні можливості та доступ до ресурсів.
- Безпека, яка фокусується на створенні безпечного та сприятливого середовища для людей та довкілля.
- Надійність, що описує здатність системи стабільно функціонувати та відповідати очікуванням.

- Професіоналізм, який підкреслює важливість компетентності та відповідального ставлення до роботи для досягнення сталого розвитку.

- Економіка, яка фокусується на створенні стійкої та справедливої економічної системи й відповідає потребам людей та довкілля.

Таким чином результати опитування свідчать про те, що здобувачі освіти мають чітке розуміння ключових принципів сталого розвитку та важливість освіти з цього напрямку.

При аналізі відповідей на запитання «Зазначте своє особисте ставлення до сталого розвитку» було з'ясовано, що найбільший відсоток здобувачів (33%) розуміють особливості цілей сталого розвитку, проте не в повній мірі мають уявлення у який спосіб можна впливати на їх досягнення. Розподіл відповідей у відсотковому співвідношенні наведений на рис. 2.



Рисунок 2 **–** Розподіл респондентів щодо зазначення особистого ставлення до сталого розвитку
Figure 2 – Distribution of respondents regarding their personal attitude towards sustainable development

Отримані результати опитування свідчать про те, що існує значний інтерес до сталого розвитку серед здобувачів освіти. Однак, їм потрібна підтримка та ресурси для того, щоб розуміти цю концепцію на глибшому рівні та втілювати її в життя. Дійсно, важливо, щоб кожна людина розуміла свою роль у досягненні цілей, визначених Організацією Об'єднаних Націй, тому здобувачам освіти при опитуванні було задане питання «Які саме з 17 цілей є найбільш пріоритетнішими для Вашої професійної діяльності?». Найбільший відсоток здобувачів обрали пріоритетною ціль №1 «Подолання бідності». Також значна увага респондентів була зосереджена на цілях №4 «Якісна освіта» та №3 «Міцне здоров'я і благополуччя», що відповідає цілям сталого розвитку, задекларованим в нормативних документах університету [8]. Зокрема, ціль №4 – є першочерговим пріоритетом для Національного транспортного університету [9, 10]. Опитування показало, що цілі сталого розвитку для здобувачів різних освітніх програм за пріоритетом є різними. Важливо також зазначити, що в залежності від конкретних обставин та викликів пріоритетні цілі сталого розвитку для здобувачів можуть змінюватися з часом.

Для з'ясування поінформованості студентів щодо стратегій сталого розвитку, наявних в університеті, здобувачам освіти було задано питання стосовно того, чи існує в університеті документ, що закріплює ці питання. Відповіді здобувачів освіти розподілилися таким чином:

- 49 здобувачів освіти знають про існування стратегії сталого розвитку в університеті та вважають, що вона активно впроваджується;
- 11 здобувачів освіти знають про існування стратегії сталого розвитку, але вважають, що вона не виконується в повній мірі;
- 52 здобувача освіти припускають, що університет має стратегію сталого розвитку, але не цікавиться цим питанням;

- 19 здобувачів освіти не знають про існування стратегії сталого розвитку в університеті;
- 51 здобувач освіти не впевнені, чи має університет стратегію сталого розвитку;
- 9 здобувачів освіти вважають, що університет не має стратегію сталого розвитку;
- 24 здобувачі освіти дали інші відповіді, які не підпадають під вищезазначені категорії.

Результати опитування засвідчили, що більшість здобувачів освіти (60%) знають про існування стратегії сталого розвитку в університеті. Проте існує потреба в кращому їх інформуванні про ці стратегії. Для досягнення відмінних результатів, важливо також залучати здобувачів освіти до розробки та реалізації цих стратегій.

Важливим аспектом опитування здобувачів освіти було визначення напрямків стратегій сталого розвитку, які впроваджуються в університеті. Здобувачі освіти, які підтвердили існування стратегії в університеті, вказали наступні пріоритетні напрямки:

- Екологічність, відновлювані ресурси, економічна ефективність: цей комплексний напрямок охоплює заходи, спрямовані на мінімізацію негативного впливу університету на навколишнє середовище, використання відновлюваних джерел енергії та оптимізацію ресурсоспоживання.
- Зниження викидів: напрямок фокусується на зменшенні викидів парникових газів та інших шкідливих речовин, що сприяє боротьбі зі зміною клімату.
- Циркулярна економіка: напрямок передбачає перехід до моделі економіки, де відходи стають ресурсами, що мінімізує негативний вплив на довкілля та стимулює нові економічні можливості.
- Інклюзивність і рівність: напрямок фокусується на забезпеченні доступності освіти та можливостей для всіх здобувачів освіти, незалежно від їхнього походження, соціального статусу чи інших факторів.
- Підготовка спеціалістів для майбутнього країни: напрямок передбачає надання здобувачам освіти знань та навичок, необхідних для роботи в умовах сталого розвитку та вирішення актуальних проблем суспільства.
- Відновлювана енергія: напрямок фокусується на переході на використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова та геотермальна, що сприяє зменшенню залежності від викопного палива.
- Інновації в екологічних технологіях: напрямок передбачає розробку та впровадження нових екологічно чистих технологій, які допомагають вирішувати проблеми довкілля та стимулюють економічне зростання.
- Залучення, діалог, партнерство: напрямок підкреслює важливість залучення до процесу розробки та реалізації стратегії сталого розвитку всіх зацікавлених сторін, включаючи здобувачів освіти, викладачів, персоналу, місцеві громади та партнерів.
- Промоція практик серед здобувачів освіти; розвиток освітніх програм; глобальна співпраця: комплексний напрямок передбачає залучення здобувачів освіти до практик сталого розвитку, розробку нових освітніх програм та співпрацю з університетами та організаціями з усього світу для обміну досвідом та кращими практиками.
- Інновації, ефективність, сталість, структурованість: комплексний напрямок поєднує в собі прагнення до інновацій, економії ресурсів, тривалого розвитку та чіткої структуризованості стратегії сталого розвитку.
- Інноваційність, ефективність, екологічність: комплексний напрямок підкреслює важливість інновацій, економії ресурсів та мінімізації негативного впливу на довкілля.
- Освіта для сталого розвитку, енергоефективність та зменшення викидів, інновації та дослідження в галузі сталого розвитку, спільнота та соціальна відповідальність: комплексний напрямок поєднує в собі освітні програми, спрямовані на сталий розвиток, енергоефективні заходи, дослідження в цій галузі та активну соціальну позицію університету.

У рамках опитування здобувачів освіти було також з'ясовано їх потребу у здобутті компетентностей сталого розвитку під час навчання в університеті. Оцінювання здійснювалося за п'ятибальною шкалою (рис 3).

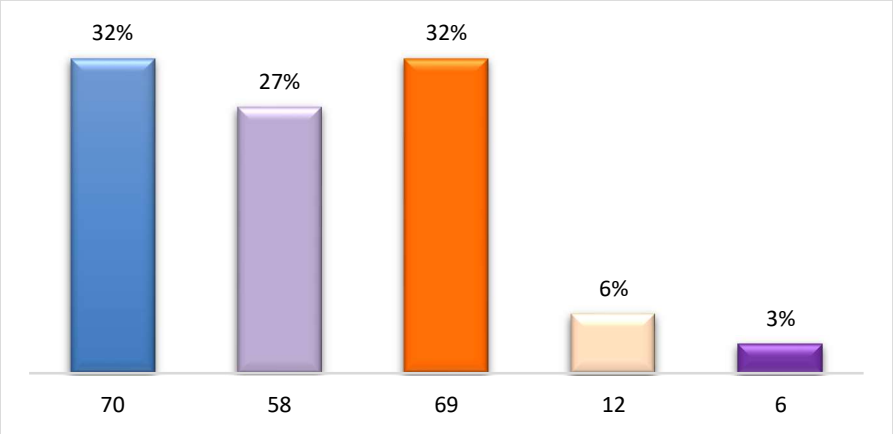


Рисунок 3 – Розподіл респондентів щодо необхідності інтегрування компетентностей сталого розвитку в освітню програму, на якій здобувачі навчаються
Figure 3 – Distribution of respondents regarding the need to integrate sustainable development competencies into the educational program in which applicants study

Отримані відповіді засвідчили про чітку підтримку ідеї інтеграції компетентностей сталого розвитку в освітні програми. Зокрема, 70 здобувачів освіти (32%) поставили найвищу оцінку (5), підкреслюючи свою однозначну потребу в таких знаннях та навичках; 58 здобувачів освіти (27%) дали оцінку "4", висловлюючи значну зацікавленість у темі та визнаючи її важливість; 69 здобувачів освіти (32%) обрали оцінку "3", демонструючи загальне схвалення інтеграції компетентностей сталого розвитку. Лише 12 здобувачів освіти (6%) поставили оцінку "2", висловлюючи сумніви щодо корисності такої інтеграції. А 6 здобувачів освіти (3%) дали найнижчу оцінку (1), категорично не погоджуючись з необхідністю вивчення питань сталого розвитку.

Результати опитування підкреслюють значну підтримку інтеграції компетентностей сталого розвитку в освітні програми серед здобувачів освіти. Більшість респондентів (197 здобувачів освіти) позитивно оцінили цю можливість, визнаючи її важливість для власного розвитку та майбутнього. Варто зазначити, що 18 здобувачів освіти висловили сумніви чи незгоду щодо інтеграції сталого розвитку. Ця група потребує додаткового розтлумачення щодо переваг та практичного застосування таких компетентностей.

Опитування чітко продемонструвало, що більшість здобувачів освіти визнають важливість сталого розвитку та бажають отримувати відповідні знання та навички в рамках освітніх програм. Це підкреслює потребу в розробці та впровадженні ефективних курсів та програм, які допоможуть здобувачам освіти стати лідерами у сфері сталого розвитку.

Для врахування інтересів здобувачів освіти щодо інтеграції концепцій сталого розвитку в відповідну освітню програму опитуваним було задано наступне питання: «Як концепція сталого розвитку повинна бути інтегрована в освітню програму, на якій Ви навчаєтесь?» (рис. 4).

Думки здобувачів освіти щодо цього питання розподілилися наступним чином:

- 52 здобувача освіти вважають, що принципи сталого розвитку повинні бути інтегровані в усі дисципліни навчального плану як окремі теми;
- 44 здобувача освіти пропонують ввести окрему дисципліну з загальних питань сталого розвитку в рамках базової підготовки;
- 44 здобувача освіти вважають, що важливо мати окрему дисципліну з питань сталого розвитку, яка буде фокусуватися на аспектах, пов'язаних з їхньою професійною діяльністю;

•51 здобувач освіти пропонує ввести окрему дисципліну з питань сталого розвитку, яку вони могли б вибрати за бажанням;

•9 здобувачів освіти не вважають, що концепцію сталого розвитку необхідно інтегрувати в освітні програми;

•11 здобувачів освіти не змогли чітко визначитися з відповіддю на питання;

•4 здобувача освіти вважають, що розробка проєктів, лабораторних робіт, досліджень або практичних завдань, які стимулюють думки про сталий розвиток та його вплив на їх галузь, є ефективним методом інтеграції цих принципів в освітні програми.

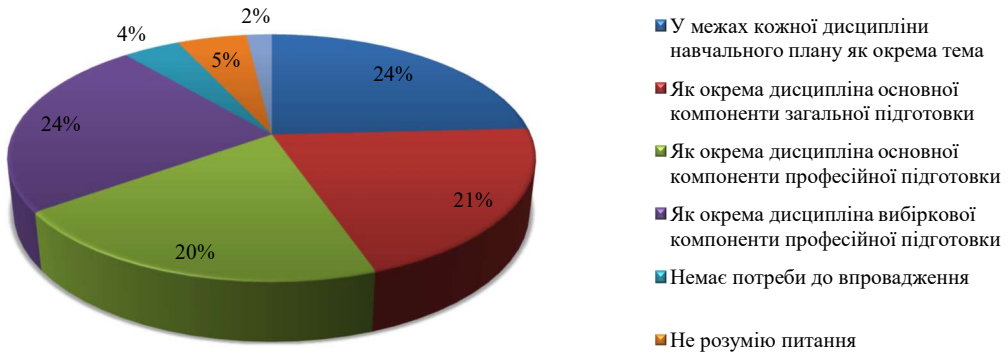


Рисунок 4 – Розподіл респондентів щодо інтеграції концепції сталого розвитку в освітні програми
Figure 4 – Distribution of respondents regarding the integration of the concept of sustainable development into educational programs

Таким чином результати опитування свідчать про те, що більшість здобувачів освіти (89%) вважають важливим інтегрувати концепцію сталого розвитку в освітні програми, хоч і запропоновані ними методи впровадження відрізняються.

Також дане опитування мало на меті визначити, які компетентності сталого розвитку здобувачі вважають найважливішими для себе в сучасних умовах (рис. 5).

☑	Підтримка справедливості	☑	Адаптивність
☑	Внесок до охорони природи	☑	Дослідницьке мислення
☑	Системне мислення	☑	Політична підтримка та відповідальні інституції
☑	Критичне мислення	☑	Колективні дії та підтримка
☑	Вміння формулювати проблемиї	☑	Грамотність та обізнаність щодо розвитку у майбутньому
☑	Індивідуальні ініціативи		

Рисунок 5 – Перелік компетентностей, які стосуються сталого розвитку та є важливими для здобувачів у сучасних умовах
Figure 5 – List of competencies related to sustainable development and important for applicants in modern conditions

Опитування показало, що здобувачі освіти обирають широкий спектр компетентностей сталого розвитку відповідно до своєї освітньої програми, тому відповіді різняться в залежності від спеціальності та пріоритетів здобувачів. Результати опитування підкреслюють важливість розвитку компетентностей сталого розвитку для сучасних фахівців.

Таким чином можна зробити висновок, що розвиток компетентностей сталості є важливим аспектом становлення сучасного фахівця. Ключовим елементом опитування здобувачів освіти було також визначення перешкод, які вони вважають визначальними для впровадження сталого розвитку в освітній процес. Відповідно до поставленого питання «Які перешкоди ви вважаєте визначальними для впровадження сталого розвитку в освітній процес?» респондентами були виокремлені основні перешкоди до такого впровадження (рис.6).



Рисунок 6 **–** Визначені здобувачами перешкоди щодо впровадження сталого розвитку в освітній процес

Figure 6 – Obstacles identified by applicants to the implementation of sustainable development in the educational process

Результати опитування свідчать про те, що впровадження сталого розвитку в освітній процес стикається з рядом серйозних перешкод, тому важливо організувати комплексний підхід для такої інтеграції.

Одним з ключових запитань, яке було задано здобувачам освіти було питання, що стосувалося необхідних компетентностей для забезпечення повоєнної відбудови України на засадах сталого розвитку (рис. 7).

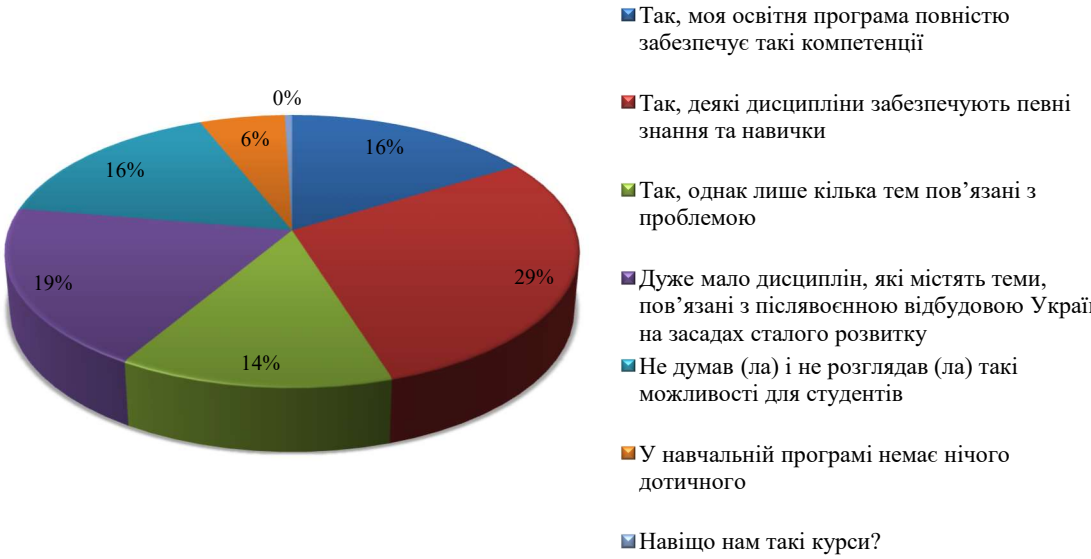


Рисунок 7 – Розподіл думок респондентів щодо відповідності освітніх програм потребам повоєнної відбудови України на засадах сталого розвитку

Figure 7 – Distribution of respondents' opinions on the compliance of educational programs with the needs of post-war reconstruction of Ukraine on the basis of sustainable development



Рисунок 8 – Розподіл за зацікавленістю здобувачів освіти у вивченні дисциплін з повоєнної відбудови України

Figure 8 – Distribution by interest of students in studying disciplines on the post-war reconstruction of Ukraine

За результатами опитування було визначено, що більше половини опитуваних респондентів вважають, що їх освітні програми повністю або частково надають необхідні компетентності для забезпечення повоєнної відбудови України на засадах сталого розвитку, але університету слід переглянути свої освітні програми та поглибити дисципліни, які нададуть здобувачам освіти знання та навички, необхідні для роботи в цій сфері. Таким чином, опитування підкреслює потребу в адаптації освітніх програм для кращої підготовки здобувачів освіти до участі у повоєнній відбудові України на засадах сталого розвитку. Тому здобувачам освіти було поставлено наступне питання: «Чи хотіли б Ви, щоб у Вашу освітню програму/модуль були введені нові дисципліни (курси), пов’язані з повоєнною відбудовою України на засадах сталого розвитку?» (рис. 8).

Отримані дані свідчать про значну зацікавленість студентів у вивченні дисциплін, пов'язаних з повоєнною відбудовою України на засадах сталого розвитку. Це підкреслює потребу в розробці та впровадженні таких курсів в освітні програми.

Останнє питання опитування здобувачів освіти було спрямоване на оцінку того, як навчання в університеті вплинуло на їх поведінку з точки зору сталого розвитку (рис. 9).



Рисунок 9 – Розподіл думок респондентів щодо впливу навчання в університеті на поведінку з точки зору сталого розвитку

Figure 9 – Distribution of respondents' opinions on the impact of university education on behavior from the perspective of sustainable development

Результати опитування свідчать про те, що навчання в університеті може мати значний вплив на поведінку здобувачів освіти з точки зору сталого розвитку. Більшість респондентів визнають позитивний вплив навчання в університеті на формування цих компетентностей.

Таким чином, підсумовуючи результати проведеного моніторингу, можна сформувати пріоритетні цілі університету стосовно врахування в освітніх програмах концепцій сталого розвитку економіки України (рис. 10).

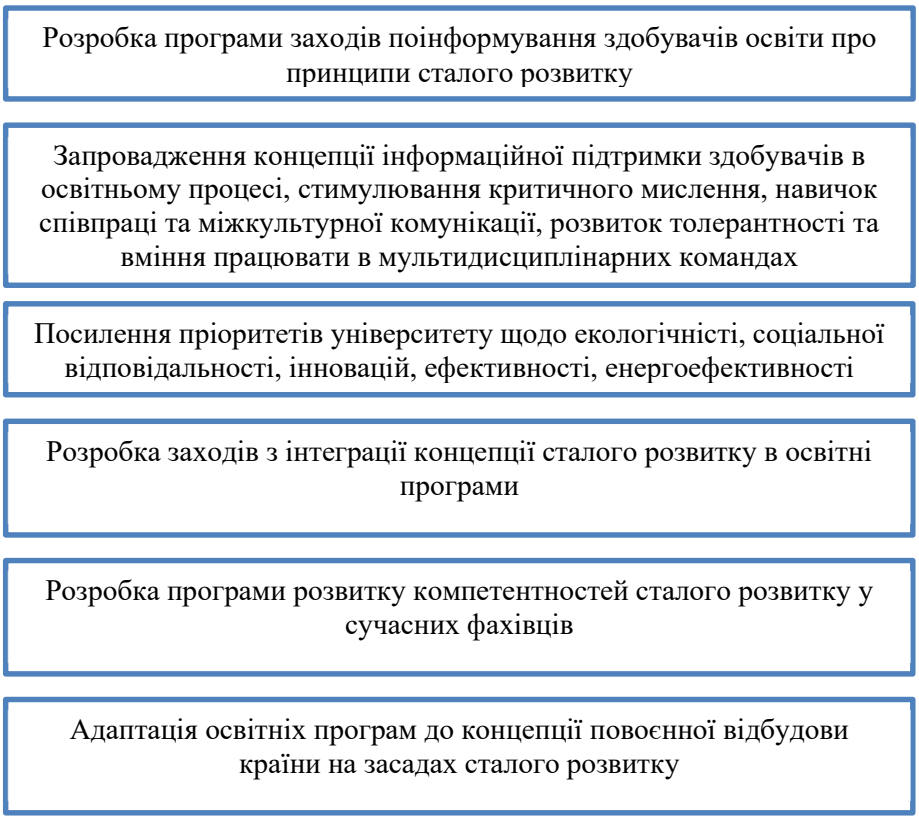


Рисунок 10 – Пріоритетні цілі університету у напрямку врахування принципів сталого розвитку в освітній діяльності
Figure 10 – Priority goals of the university in the direction of taking into account the principles of sustainable development in educational activities

Отже пріоритетні цілі університету щодо розвитку компетентностей у студентів в контексті цілей сталого розвитку, задекларованих ООН, полягають у вихованні свідомих, відповідальних та ініціативних фахівців, здатних вирішувати складні проблеми економіки країни в сучасних умовах.

Висновки. В рамках участі Національного транспортного університету в 2024 році в проєкті «Network of Transformational Learning to Ensure the Sustainability of Assistance to Ukrainian Higher Education in Ensuring a Sustainable and Powerful Restoration of (post-war) Ukraine» було проведено моніторинг компетентностей здобувачів вищої освіти з метою оцінювання їх розуміння та сприйняття концепції сталого розвитку. Опитування охопило здобувачів освіти з першого по третій рівень здобуття освіти. Результати проведеного опитування чітко підкреслюють важливість освіти з питань сталого розвитку. Визначено, що необхідно поглиблювати інформування здобувачів освіти щодо цих аспектів. Аналіз відповідей свідчить про те, що молоде покоління усвідомлює важливість цієї проблеми та готове докладати зусиль для її вирішення. Однак, опитування також показало, що здобувачам освіти потрібна підтримка та ресурси для того, щоб глибше розуміти концепцію сталого розвитку та втілювати її в життя. З'ясувалось, що вплив сталого розвитку на різні сфери діяльності має різний характер, оскільки визначені пріоритетні цілі сталого розвитку для різних освітніх програм відрізняються.

Опитування чітко показало, що більшість здобувачів освіти університету розуміють важливість сталого розвитку для суспільства та довкілля, бажають отримувати знання та навички стати лідерами у сфері сталого розвитку. Більшість здобувачів освіти НТУ підтримують інтеграцію концепції сталого розвитку в освітні програми. Це свідчить про зростаючу усвідомленість важливості цієї теми серед молоді. Проте результати моніторингу засвідчили, що впровадження сталого розвитку в освітній процес стикається з рядом серйозних перешкод, тому існує необхідність застосування комплексного підходу такого впровадження.

Переважна більшість здобувачів освіти визнають важливість вивчення дисциплін, пов'язаних з повоєнною відбудовою України на засадах сталого розвитку та бажають отримати необхідні знання та навички, а також готові брати активну участь у розробці та реалізації проєктів з повоєнної відбудови. Це свідчить про значний потенціал для розвитку освіти у цьому напрямку.

Більшість опитаних здобувачів освіти:

- визнають, що навчання в університеті позитивно вплинуло на їх розуміння принципів сталого розвитку;
- змінили свою поведінку в більш екологічно відповідальному напрямку, наприклад, стали менше використовувати енергії та води, частіше сортувати сміття та обирати екологічно чисті продукти;
- вважають, що університету слід робити більше для сприяння сталому розвитку, наприклад, пропонувати більше курсів з цієї теми, використовувати екологічно чисті технології та практики, а також заохочувати здобувачів освіти до участі в проєктах зі сталого розвитку.

Таким чином, вплив університету на поведінку здобувачів освіти у сфері сталого розвитку може відігравати вирішальну роль. Тому університету потрібно здійснювати політику щодо своєчасного якісного поінформування здобувачів про принципи сталого розвитку та адаптувати освітні програми під сучасні виклики.

Такі результати дослідження підкреслюють важливість ролі університету у сприянні сталому розвитку та будуть враховані при черговому оновленні освітніх програм Національного транспортного університету, розробці нових курсів, оновленні модулів освітніх компонентів.

Перелік посилань

1. Програма розвитку Організації Об'єднаних Націй. (2022). Доступно за посиланням: https://www.undp.org/sustainable-development-goals (дата звернення: 10 травня 2025 р.)

2. Albareda-Tiana, S., Ruíz-Morales, J., Azcárate, P., Valderrama-Hernández, R., & Múñoz, J. M. (2020). The EDINSOST project: Implementing the sustainable development goals at university level. Universities as Living Labs for Sustainable Development: Supporting the Implementation of the Sustainable Development Goals. World Sustainability Series. Springer, Cham, pp. 193-210. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15604-6_13

3. Chaleta, E., Saraiva, M., Leal, F., Fialho, I., & Borralho, A. (2021). Higher education and sustainable development goals (SDG)—potential contribution of the undergraduate courses of the school of social sciences of the University of Évora. Sustainability, 13 (4), 1828. https://doi.org/10.3390/su13041828

4. Murillo-Vargas, G., Gonzalez-Campo, C. H., & Brath, D. I. (2020). Mapping the integration of the sustainable development goals in universities: is it a field of study?. Journal of Teacher Education for Sustainability, 22(2), pp. 7-25. https://doi.org/10.2478/jtes-2020-0013

5. Положення про акредитацію освітніх програм, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти: Наказ Міністерства освіти і науки України від 15 травня 2024 року № 686. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1013-24#Text (дата звернення: 10 травня 2025 р.)

6. Роз'яснення щодо застосування Критеріїв оцінювання якості освітньої програми: методичний посібник [Електронне видання] / А. Бутенко, Г. Денискіна, О. Єременко, О. Книш, І. Сімшаг, О. Требенко. – Київ : Національне агентство із забезпечення якості вищої освіти, 2024. – 127 с.

7. Khrutba, V., Rutkovska, I., & Kharchenko, A. (2024). Development Of A Systematic Approach To Assessing The Compliance Of University Educational Programs With The Un Sustainable Development Goals. Green, Blue and Digital Economy Journal, 5(2), 21-30. https://doi.org/10.30525/2661-5169/2024-2-3

8. Дмитриченко М.Ф., Грищук О.К., Харута В.С., Харченко А.М. Assessment Of University Activities In The Context Of Compliance With The Goals Of Sustainable Development. Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», 2024. Випуск 115. Частина 2. С.170-179. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.2-170-179

9. Статут Національного транспортного університету (2023). URL: http://vstup.ntu.edu.ua/publichna_info/statut-ntu.pdf

10. Стратегія розвитку Національного транспортного університету на 2019-2025 роки. URL: http://www.ntu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/12/monitoring_ntu.pdf

MONITORING OF ACQUIRED COMPETENCES BY HIGHER EDUCATION STUDENTS IN NATIONAL TRANSPORT UNIVERSITY RELATION TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

Kharchenko Anna V., National Transport University, Department of Transport Construction and Property Management, e-mail: a.kharchenko@ntu.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8166-6389 ResearcherID: http://www.researcherid.com/rid/3759677

Khrutba Viktoriia O., National Transport University, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, E-mail: viktoriia.khrutba@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8121-2042 Researcher ID: http://www.researcherid.com/rid/24294268

Dobrovolska Anna M., Ph.D., associate professor, National Transport University, associate professor of Department of transport Law and Logistics, e-mail: anet_chechet@ukr.net, tel. +380634321538, https://orcid.org/0000-0002-5912-0678

Artemchuk Yuliia V., National Transport University, Department of Transport Systems and Traffic Safety, Assistant, e-mail: art_julia@i.ua, тел.: +380636047172; id ORCID: https://orcid.org/0000- 0002-3872-7745

Summary. The article is devoted to the consideration of an important issue of today - the analysis of the results of monitoring the acquired competencies of higher education students regarding sustainable development goals at the National Transport University, which was conducted in 2024 as part of the university's participation in the project "Network of Transformational Learning to Ensure the Sustainability of Assistance to Ukrainian Higher Education in Ensuring a Sustainable and Powerful Restoration of (post-war) Ukraine". The monitoring covered 215 university higher education students. The survey results revealed a range of diverse and ambiguous opinions of students regarding sustainable development, as well as differences in priorities depending on the educational program, and the need to apply an integrated approach to implementing sustainable development in the educational process was established. It was found that a significant percentage of students are at the stage of studying the concept of sustainable development and are interested in this issue, however, there is a need to develop measures to explain practical aspects regarding their personal involvement. Respondents recognized the priority of taking into account aspects of sustainable development in the educational process, however, it was found that they lack practical knowledge and tools to implement their acquired competencies in life, which determines the importance of the role of the university in promoting sustainable development and the need to take into account the results of this monitoring during the next update of educational programs. It was determined that the priority goals of a higher education institution in this direction should be: developing a program of measures to inform participants in the educational process, introducing the concept of information support for higher education students, strengthening the university's priorities regarding environmental friendliness, energy efficiency and social responsibility, developing measures to integrate the concept of sustainable development into educational

programs, developing a program for developing the competencies of applicants, adapting educational programs to the concept of post-war reconstruction of the country.

Keywords: monitoring, sustainable development, educational process, sustainable development goals, educational programs, higher education students.

References

1. Prohrama rozvytku Orhanizatsii Obiednanykh Natsii. (2022). Dostupno za posylanniam: https://www.undp.org/sustainable-development-goals (data zvernennia: 10 serpnia 2024 r.) [in Ukrainian]

2. Albareda-Tiana, S., Ruíz-Morales, J., Azcárate, P., Valderrama-Hernández, R., & Múñoz, J. M. (2020). The EDINSOST project: Implementing the sustainable development goals at university level. Universities as Living Labs for Sustainable Development: Supporting the Implementation of the Sustainable Development Goals. World Sustainability Series. Springer, Cham, pp. 193-210. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15604-6_13 [in English]

3. Chaleta, E., Saraiva, M., Leal, F., Fialho, I., & Borralho, A. (2021). Higher education and sustainable development goals (SDG)—potential contribution of the undergraduate courses of the school of social sciences of the University of Évora. Sustainability, 13 (4), 1828. https://doi.org/10.3390/su13041828 [in English]

4. Murillo-Vargas, G., Gonzalez-Campo, C. H., & Brath, D. I. (2020). Mapping the integration of the sustainable development goals in universities: is it a field of study?. Journal of Teacher Education for Sustainability, 22(2), pp. 7-25. https://doi.org/10.2478/jtes-2020-0013 [in English]

5. Polozhennia pro akredytatsiiu osvitnikh prohram, za yakymy zdiisniuietsia pidhotovka zdobuvachiv vyshchoi osvity : Nakaz Ministerstva osvity i nauky Ukrainy vid 15 travnia 2024 roku № 686. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1013-24#Text [in Ukrainian]

6. Roziasnennia shchodo zastosuvannia Kryteriiv otsiniuvannia yakosti osvitnoi prohramy: metodychnyi posibnyk [Elektronne vydannia] / A. Butenko, H. Denyskina, O. Yeremenko, O. Knysh, I. Simshah, O. Trebenko. – Kyiv : Natsionalne ahentstvo iz zabezpechennia yakosti vyshchoi osvity, 2024. – 127 s. [in Ukrainian]

7. Khrutba, V., Rutkovska, I., & Kharchenko, A. (2024). Development Of A Systematic Approach To Assessing The Compliance Of University Educational Programs With The Un Sustainable Development Goals. Green, Blue and Digital Economy Journal, 5(2), 21-30. https://doi.org/10.30525/2661-5169/2024-2-3 [in English]

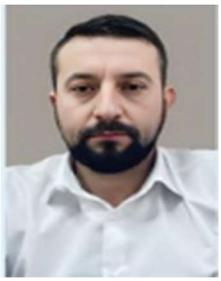
8. Dmytrychenko M.F., Hryshchuk O.K., Kharuta V.S., Kharchenko A.M., Assessment Of University Activities In The Context Of Compliance With The Goals Of Sustainable Development. Naukovyi zhurnal «Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo», 2024. Vypusk 115. Chastyna 2. C.170-179. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.2-170-179. [in English]

9. Statut Natsionalnoho transportnoho universytetu (2023). URL: http://vstup.ntu.edu.ua/publichna_info/statut-ntu.pdf. [in Ukrainian]

10. Stratehiia rozvytku Natsionalnoho transportnoho universytetu na 2019-2025 roky. URL: http://www.ntu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/12/monitoring_ntu.pdf. [in Ukrainian].

УДК 624.21
UDC 624.21
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-031-040

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ АВТОМОБІЛЬНИХ МОСТІВ В УКРАЇНІ
RESEARCH OF THE TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE SPAN STRUCTURES OF ROAD BRIDGES IN UKRAINE



Аксьонов Сергій Юрійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри «Мостів, тунелів та гідротехнічних споруд», Національний транспортний університет, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка,1, e-mail: Aksenov121@gmail.com, +380971534406, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1.*

https://orcid.org/0000-0002-6749-3909



Мінюкова Анна Дмитрівна, *аспірант кафедри «Мостів, тунелів та гідротехнічних споруд», Національний транспортний університет, e-mai: anyminyukov@gmail.com, +380958395152, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1.*

https://orcid.org/0000-0002-1830-0189

Анотація. У статті розглядається проблема старіння залізобетонних прогонових будов, зокрема мостових конструкцій, побудованих у 60-70-х роках XX століття, які не відповідають сучасним вимогам через фізичне та моральне старіння. Аналізується вплив перевищення проектного строку служби та порушення міжремонтних термінів на зношування та пошкодження основних елементів конструкцій, що призводить до підвищеного ризику для безпеки мостів. Стаття фокусується на дослідженні причин зниження довговічності таких споруд, а також на актуальних методах оцінки стану та ремонту цих конструкцій. Окрему увагу приділено необхідності розробки нових підходів до моніторингу, діагностики та посилення залізобетонних прогонових будов з урахуванням зміни умов експлуатації та технологій ремонту.У статті аналізуються останні наукові розробки щодо підсилення прогонових будов, зокрема, методи підвищення довговічності та зміцнення конструкцій. Зазначено важливість підсилення старих мостів, адже більшість з них, особливо залізобетонні конструкції, не відповідають сучасним вимогам через значний знос. Розглядаються також ефективні методи, такі як зовнішнє попереньо напрежене армування, що дозволяє здійснити зміцнення конструкцій без порушення транспортного потоку.

Ключові слова: залізобетонні прогонові будови, довговічність конструкцій, втомні пошкодження, експлуатаційний ресурс, технічний стан.

Вступ. Постановка проблеми. Мостове господарство України перебуває у критичному стані через значний фізичний знос конструкцій, недостатнє фінансування, відсутність ремонту та експлуатації, а також вплив зовнішніх факторів, зокрема збільшення транспортного навантаження та військових дій. Основними проблемами є старіння залізобетонних прогонових будов, корозія арматури, руйнування гідроізоляції, порушення несної здатності та обмеження експлуатаційних характеристик. Відсутність системного моніторингу та несвоєчасне виконання ремонтних робіт призводять до аварійності та потреби у значних фінансових вкладеннях для реконструкції та заміни

конструкцій. Для забезпечення довговічності та безпечної експлуатації мостів необхідно впроваджувати сучасні методи діагностики та підсилення конструкцій, а також розробити комплексну програму управління мостовим господарством, спрямовану на своєчасний ремонт і модернізацію споруд.

Формулювання мети дослідження (постановка завдання): метою дослідження є аналіз сучасного стану мостового господарства України, визначення основних факторів, що впливають на довговічність та експлуатаційну надійність прогонових будов, а також обґрунтування ефективних методів їх підсилення для продовження строку служби**.**

Методологія: дослідження основних факторів деградації залізобетонної конструкції.

Результати: встановлено, що значна частина залізобетонних верхніх конструкцій потребує посилення через втрату несучої здатності. Отримані дані свідчать про недостатньо вивчені фактори, що впливають на стійкість окремих елементів конструкції та втому матеріалу. Властивості втоми слід додатково досліджувати, щоб зробити висновки на основі прикладів аварій мостів і допомогти усунути причини, що призводять до таких руйнувань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій: проблема довговічності та підсилення прогонових будов мостів є надзвичайно актуальною для сучасного мостобудування, оскільки стан мостової інфраструктури безпосередньо впливає на безпеку та ефективність транспортних перевезень. Дослідженням цієї тематики займалися українські науковці, такі як: Лантух-Лященко, Більченко А.В., Кіслов О.Г., Синьковська О.В., Ігнатенко А.В. У своїх роботах дослідники розглядали питання технічного стану мостових споруд, оцінки їх довговічності, методів підсилення та відновлення. Зокрема, увага приділяється проблемам втомного зношення конструкцій, корозії арматури та неефективності традиційних ремонтних заходів. М. М. Попович досліджував підсилення залізобетонних балкових прогінних будов з використанням шпренгелів і попередньо напружених стрижнів. У своїх дослідженнях він акцентує увагу, що підсилення прогонових будов внаслідок їх морального та фізичного зносу виконується надзвичайно рідко. В випадках коли здійснюється підсилення, воно виконується без розвантаження від власної ваги у зв'язку з тим, що здійснити це буває практично неможливо, що в значній мірі може впливати на результат. Також підсилення прогонової будови із ненапруженою арматурою є проблематичним на спорудах, які мають лімітовані підмостові габарити, а саме: шляхопроводи через залізниці або автомобільні дороги, трамвайні та тролейбусні лінії тощо. Що в свою чергу вказує, що питання підкислення прогонових будов є недостатньо дослідженим в Україні.

Зарубіжні науковці, такі як Thiru Aravinthan, Thuraichamy Guganesan і Suntharavadivel, також досліджували проблему зміцнення старих мостових конструкцій, зокрема з урахуванням збільшення транспортного навантаження. Вони відзначають, що за останні кілька десятиліть спостерігається значне зростання об'ємів і ваги великовагових транспортних засобів, що значно впливає на стан мостів, особливо тих, що були побудовані понад сорок років тому. Більше п'ятдесяти відсотків мостових конструкцій у світі застаріли, і через це вони не можуть виконувати сучасні вимоги щодо вантажопотоків, що веде до необхідності обмеження ваги, зміцнення або навіть повної заміни таких споруд. У своїх дослідженнях ці вчені акцентують увагу на розробці рентабельних методів зміцнення мостів. Одним з таких методів є зовнішнє постнатягування, яке набуває все більшої популярності завдяки своїм перевагам, зокрема швидкості виконання робіт і мінімальному порушенню транспортного потоку. Цей метод активно застосовується не лише для зміцнення нових мостів, а й для відновлення старих конструкцій.

Однак, попри значну кількість наукових досліджень, у відкритих джерелах залишається недостатньо висвітленим питання впровадження інноваційних технологій підсилення прогонових будов. Зокрема, бракує детальних досліджень щодо ефективності методів зовнішнього поперечно-напруженого армування, оптимізації конструктивних схем та їхньої довготривалої поведінки в реальних умовах експлуатації. Важливим напрямком подальших наукових досліджень є виконання аналізу, експериментальних і чисельних досліджень, а також розробка рекомендацій з проєктування монолітних попередньо-напружених мостів із напруженням на бетон (пост-напружені системи)..

Таким чином, подальші дослідження у сфері підвищення довговічності залізобетонних прогонових будов мають бути зосереджені на розробці та впровадженні нових методів підсилення, які забезпечать підвищену стійкість до втомних навантажень, довговічність у агресивних середовищах та економічну ефективність відновлення мостів.

Основна частина. Більшість мостів в Україні були збудовані в 60–70-х роках минулого століття та не відповідають сучасним вимогам через фізичну та моральну втому. Стратегією їхньої експлуатації протягом останніх 30 років фактично було очікування повного виходу споруди з працездатного стану з подальшою розробкою плану заміни. Такий підхід не вимагав від держави значних фінансових вкладень у технічне обслуговування. Більшість мостів по всій країні десятиліттями функціонують без проведення капітальних ремонтів або навіть без належного поточного обслуговування. Для них були порушені міжремонтні терміни, а нормативна експлуатація фактично відсутня. У результаті по всій країні склалася критична ситуація: 50% мостових споруд потребують невідкладного ремонту або повного перекриття руху. Накопичення цих проблем значно ускладнює пріоритезацію робіт, оскільки кожен міст має свої критичні елементи, які потребують негайної уваги.

Вважається, що термін служби мостових споруд становить 100 років, оскільки найбільш довговічними їхніми елементами є опори та фундаменти. Водночас термін експлуатації прогонових будов є значно коротшим — близько 40 років за умови повної відсутності систематичних ремонтних робіт. Переважна більшість мостів в Україні — залізобетонні. На автомобільних дорогах загального користування державного значення їхня частка становить майже 94 % [1].

Найпоширенішими конструкціями старих мостів є збірні залізобетонні попередньо-напружені таврові балки, виготовлені за типовим проєктом. Ці балки мають різні довжини, серед яких найпоширенішими є варіанти 33 м, 24 м та 21 м. Вони активно використовувалися для будівництва мостів у період інтенсивного розвитку інфраструктури, однак з часом ці конструкції потребують ретельного обслуговування та ремонту через фізичну зношеність і можливі пошкодження, спричинені перевищенням проєктного терміну експлуатації. Штучна споруда, а отже, і прогонова будова протягом своєї експлуатації проходить три важливі етапи. Перший етап характеризується тим, що побудоване спорудження експлуатується певний час без зниження надійності. Протягом цього періоду здійснюється лише догляд за спорудою, без проведення значних ремонтних робіт. Другий етап експлуатації відзначається появою та розвитком дефектів, зміною властивостей бетону та корозією арматури. Дефекти впливають на несучу здатність балок прогонових будов і розподіл тимчасових навантажень між ними. Міст продовжує експлуатуватися в тому ж режимі, хоча надійність прогонових будов поступово знижується. На цьому етапі за мостом ведеться догляд і проводяться планові профілактичні роботи в рамках заходів з утримання. За відсутності належного догляду та профілактичних заходів, практика та досвід оцінки рівня корозії арматури свідчать, що захисний шар бетону в залізобетонних конструкціях починає швидко руйнуватися під впливом навколишнього середовища — вже протягом 10–15 років. Надалі розвивається агресивна корозія робочої арматури, що спричиняє збільшення її об’ємів, утворення тріщин і поступове руйнування захисного шару. У результаті це може призвести до повної деградації залізобетону через 30–40 років [2]. Третій етап експлуатації споруди характеризується двома факторами: по-перше, наявністю дефектів в конструкціях, в першу чергу в прогонових будовах, що знижують їх несучу здатність і вантажопідйомність моста загалом; по-друге, введенням обмежень щодо маси транспортного засобу, який може безпечно рухатися по мосту в неконтрольованому режимі. На третьому етапі експлуатації моста обов'язково має бути виконаний його ремонт, не чекаючи на момент повного руйнування споруди. Оцінка технічного стану мостових конструкцій є ключовим етапом для визначення необхідності ремонту або реконструкції. У процесі визначення технічного стану залізобетонних конструкцій вивчають наявну проектну та експлуатаційну документацію, виконують огляд та інструментальну оцінку параметрів міцності конструкцій, а також їх експлуатаційних якостей [5]. Відповідно до класифікації стану прогонових будов, більшість із них перебувають у межах 3-го та 4-го станів, що свідчить про значний рівень зношеності та необхідність термінових заходів. За даними Київавтодору в таблиці 1 наведено розподіл залізобетоних прогоновиз будов за технічним станом:

Таблиця 1 **–** Розподіл залізобетоних прогонових будов за технічним станом
Table 1 **–** Distribution of Reinforced Concrete Span Structures by Technical Condition

Стан прогонових будов	**Відсоток (%)**
Справний (стан 1)	11.43%
Обмежено справний (стан 2)	14.29%
Працездатний (стан 3)	25.14%
Обмежено працездатний (стан 4)	32.00%
Непрацездатний (стан 5)	17.14%

Вантажопідйомність балкових залізобетонних прогонових будов залежить від кількох критичних факторів:

- фактична міцність бетону та зменшення площі арматурної сталі. Внаслідок цього знижується здатність конструкції сприймати навантаження, що призводить до поступового зменшення її вантажопідйомності.
- фізичний стан конструкції. Наявність тріщин, пошкоджень, наслідки атмосферного впливу або корозії можуть значно знизити вантажопідйомність споруди.
- динамічна взаємодія з транспортним навантаженням. Прогонові будови піддаються постійному впливу рухомого транспорту, який спричиняє коливання та удари під час руху. Це може призвести до накопичення втомних пошкоджень і поступового зниження їхньої несної здатності.
- якість виготовлення, монтажування, підсилення чи ремонтування. Слід зауважити, що дефекти, які виникають на етапі будівництва або в процесі відновлення, можуть знизити довговічність конструкції.

Основною причиною виходу з ладу залізобетонних конструкцій мостів є втома матеріалу, що виникає під впливом змінних експлуатаційних навантажень. Накопичення втомних пошкоджень у зонах концентрації напружень призводить до утворення та розвитку тріщин, які, досягаючи критичних розмірів, можуть спричинити руйнування окремих елементів або навіть усієї конструкції. За останні 5–7 років на мостах автомобільних доріг України відбулися значні зміни інтенсивності та складу транспортних потоків. При цьому навантаження, яке установлене діючими нормами, не враховує тенденцію до підвищення ваги автомобілів. Тому вже в середині строку служби, а тим більше під кінець строку служби, міст перестає відповідати навантаженню від тих транспортних засобів, які з`являться в майбутньому за строк служби моста. При цьому значна частина життєвого циклу споруди проходить в умовах перевантаження, що призводить до передчасного руйнування і перевитрат коштів на ремонти [7].

При обстеженні конструкцій прогонових будов найчастіше виявляються пошкодження наведені у Таблиці 2 та Рис. 1, Рис. 2 та Рис.3, які перешкоджають нормальній і безпечній експлуатації, а саме:

Аналіз виявлених дефектів та факторів, що впливають на довговічність прогонових будов, підтверджує критичну необхідність своєчасного виявлення та усунення пошкоджень на початкових стадіях їх розвитку. Втомні процеси матеріалів, корозія арматури, порушення гідроізоляції та водовідведення є основними чинниками зниження несної здатності мостових конструкцій, що підвищує ризик їх аварійності. З огляду на те, що вартість прогонових будов становить 60–65% від загальної вартості моста, їх підтримка в працездатному стані та покращення їхнього структурного стану є першочерговою задачею для продовження терміну служби мостових споруд.

Таблиця 2 – Типові дефекти залізобетонних прогонових будов, їх причини та наслідки
Table 2 – Typical Defects of Reinforced Concrete Span Structures, Their Causes, and Consequences

Вид дефекту	**Причини винекнення**	**Наслідки**
Руйнування захисного шару бетону прогонових будов споруди	Дефекти бетонування, вплив циклічних навантажень, проникнення вологи, агресивні середовища, вібрації, замерзання та відтавання.	Втрата захисних властивостей бетону, прискорена корозія арматури, зниження несної здатності конструкції.
Замокання граней балок	Руйнування гідроізоляції, зруйновані деформаційні шви, неефективна система водовідведення, наявність технологічних і монтажних отворів.	Вилуговування цементного каменю, утворення сталактитів, погіршення міцності бетону, утворення вторинних тріщин.
Руйнування ребер балок у місцях обпирання (Рис. 1)	Концентрація напружень, корозія арматури, перевантаження, погіршення адгезії арматури з бетоном.	Ослаблення місць опирання, збільшення прогинів, можливе руйнування опорної частини конструкції.
Оголення і корозія арматури (Рис.2)	Руйнування захисного шару бетону, проникнення води та солей, карбонізація бетону, недостатня товщина захисного шару.	Ослаблення несної здатності, підвищений ризик руйнування балок, зниження довговічності конструкції.
Локальні руйнування бетонного каменю в місцях дії поперечних сил	Втомне руйнування, недостатнє армування, вплив динамічних навантажень, корозія арматури.	Зменшення несної здатності, розширення зон руйнування, підвищена аварійність конструкції.
Тріщини (Рис. 3)	Недостатня жорсткість з'єднання, температурні деформації, неякісне виконання ремонтинх робіт	Зниження несної здатності, ризик розвитку прогресуючих руйнувань.

Необхідним є проведення оцінки впливу можливого розвитку виявлених дефектів на експлуатаційні якості споруди. Вибір стратегії відновлювальних робіт здійснюється на основі мінімальних капіталовкладень, що виходять із нормативного терміну експлуатації конструкції. Обов'язково, як альтернатива, розглядається повна заміна дефектних елементів конструкцій на нові [6]. Оцінка здатності матеріалів конструкції протистояти розвитку втомних пошкоджень є важливим етапом у прогнозуванні надійності та довговічності мостів. Це особливо актуально для старих мостів, які вже мають великий період експлуатації. В таких випадках основним завданням є виявлення існуючих дефектів у конструкції та визначення ризику їхнього подальшого розвитку до критичних розмірів. Своєчасне усунення пошкоджень на початкових етапах їх виникнення є запорукою безпечної та надійної роботи мостових споруд.



Рисунок 1 – Тріщини, сколи бетону з оголенням та корозією арматури в місці обпирання
Figure 1 – Cracks, Concrete Spalling with Reinforcement Exposure and Corrosion at the Support Area



Рисунок 2 – Оголення і корозія арматури
Figure 2 – Reinforcement Exposure and Corrosion

З часом інфраструктура продовжуватиме старіти, а частина прогонових будов які нині перебувають у працездатному стані, перейдуть до категорії непрацездатних. Враховуючи, що значна частина мостового господарства України була збудована у 1960–1970-х роках, багато конструкцій вже наближаються до граничного стану. Важливим є не лише ремонт уже пошкоджених та непрацездатних споруд, але й підтримання працездатних прогонових будов у задовільному технічному стані. Задля недопущення подальшого руйнування є необхідність оптимізації навантажень і деформацій, що виникають під час експлуатації мосту. Це дозволить рівномірно розподіляти навантаження між

елементами конструкції, зменшуючи ризик їх передчасного пошкодження. Для цього важливо застосовувати сучасні методи діагностики та моніторингу, що дозволяють своєчасно виявляти потенційні проблеми. Превентивні заходи, спрямовані на збереження ресурсної працездатності конструкцій, дозволять значно зменшити витрати на їх відновлення у майбутньому та знизити ризики виникнення аварійних ситуацій. На довговічність споруди також має суттєвий вплив її живучість – властивість зберігати несучу здатність навіть при пошкодженні або руйнуванні окремих частин або елементів. Для забезпечення живучості прогонових будов важливим є також запобігання прогресуючому руйнуванню, коли дефекти, що з'являються на одних елементах, можуть поширюватися на інші, що веде до повного руйнування конструкції. Важливим інструментом для підвищення живучості є використання посилення конструкцій: це може включати використання додаткових армувальних елементів, застосування захисних покриттів для запобігання корозії, а також застосування новітніх технологій, таких як зовнішнє натягування чи композитні матеріали.



Рисунок 3 **–** Тріщини нижнього поясу
Figure 3 **–** Cracks in the bottom chord

Традиційні підходи до посилення залізобетонних конструкцій зазвичай включають три основні способи:

1. Зміна конструктивної схеми. Встановлення додаткових жорстких або упругих опор у місцях, що піддаються згинанню.
2. Зміна напруженого стану. Використання преднапряжених затяжок у розтягнутих зонах конструктивних елементів або встановлення попередньо напружених распорок у колоннах.
3. Збільшення перетину елементів. Застосування обойм, рубашок або односторонніх і двосторонніх наращувань для збільшення січення конструкцій.

Попри успішність цих методів, вони мають свої обмеження: часто посилення здійснюється лише після виникнення пошкоджень, що зумовлює високі витрати на ремонт та реконструкцію.

Загалом, підвищення живучості прогонових будов є одним з ключових завдань, яке дозволяє значно продовжити термін служби мостових споруд, навіть у разі поступового старіння інфраструктури. Таким чином, живучість є не тільки характеристикою конструкцій, що забезпечує їх

функціонування в умовах пошкоджень, але і важливою складовою стратегії подовження терміну служби інфраструктурних об'єктів, зокрема мостів і прогонових будов, що мають значний вплив на безпеку та економічну ефективність транспорту та регіональної інфраструктури.

Висновок

Результати дослідження підтверджують актуальність проблеми зношення залізобетонних прогонових будов та необхідність удосконалення підходів до їх оцінки, ремонту та експлуатації. Аналіз сучасного стану мостових споруд свідчить про значне зношення конструкцій, яке зумовлене фізичним впливом навантажень, корозією матеріалів та недостатнім рівнем обслуговування. Для підвищення довговічності мостів та продовження їх експлуатаційного строку критично важливим є своєчасне підсилення прогонових будов, які є основними несучими елементами конструкції. Фізичний знос, корозія матеріалів, вплив змінних навантажень та агресивних середовищ призводять до поступового зниження несної здатності, що підвищує ризик аварійності.

Для запобігання подальшому зношенню конструкцій важливо дотримуватися нормативних міжремонтних термінів на нових та відремонтованих мостах, оскільки це дозволяє своєчасно усувати дефекти та підтримувати конструкції в належному стані.

Застосування сучасних методів посилення, оптимізація розподілу навантажень та контроль за технічним станом не лише збільшують строк служби прогонових будов, а й підвищують ефективність і безпеку мостових споруд загалом. Інноваційні технології діагностики та зміцнення конструкцій забезпечують можливість вчасно усувати критичні дефекти, запобігаючи розвитку прогресуючих руйнувань.

Таким чином, стратегія довговічності мостів має базуватися на систематичному моніторингу, своєчасному підсиленні та впровадженні новітніх технологій, що гарантуватимуть надійність і безпечну експлуатацію транспортної інфраструктури.

Перелік посилань

1. Каськів В. І.,, Панібратець Л. Г., Степанов С. М., Грінів В. С., Чайковська Л. І. Стан мостового господарства України на дорогах загального користування державного значення на підконтрольних територіях за 2023 рік.
2. Більченко А.В., Кіслов О.Г., Синьковська О.В., Ігнатенко А.В. Довговічність залізобетонних конструкцій є основою життєвого циклу мостових споруд.
3. Страхова Н.Є., Голубев В.О., Ковальов П. М. Експлуатація і реконструкція мостів. В.В. - 2-е вид., випр. - К.: 2002. 408 с., іл. За редакцією Лантуха-Лященка А.І.
4. ДСТУ 9181:2022. Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2022. 32 с. (Інформація та документація).
5. РВ.3.2-03450778-832:2013. Рекомендації з проектування монолітних попередньо-напружених мостів з напруженням на бетон (пост-напружені системи). Київ, 2013.
6. РВ.3.2-218-03450778-741:2008. Рекомендації з підсилення конструкцій мостів під навантаженням, в т.ч. з регулюванням зусиль. Київ, 2008.
7. Єрмакова І. А., Нечипоренко М. В. Перспективні розрахункові навантаження для мостів на автомобільних дорогах.
8. Лантух-Лященко А.І. Модель визначення надійності прогонової будови в умовах неповної інформації // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – Вип. 62. – К.: 2001.
9. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». Вип. 57. – 1999. – С. 183-188.
10. Дегтяр В.Г. До проблеми оцінки зносу елементів моста / В.Г. Дегтяр, А.І. Лантух-Лященко // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». Вип. 59. Український транспортний університет. – К.: 2000. – С. 33-36.
11. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування.

12. Борщов В.І., Закора О.Л. Мости і труби. Підручник. Том 2. Залізобетонні мости. Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2012. 393 с.
13. Попович М. М., Миронюк О. С., Борщов В. І. Підсилення залізобетонних балкових прогінних будов з використанням шпренгелів і попередньо напружених стрижнів.
14. Thuraichamy Guganesan Suntharavadivel, Thiru Aravinthan. Overview of external post-tensioning in bridges.

RESEARCH OF THE TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE SPAN STRUCTURES OF ROAD BRIDGES IN UKRAINE

Aksonov Sergii Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures", National Transport University, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, e-mail: Aksenov121@gmail.com, +380971534406, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovicha-Pavlenko, 1. https://orcid.org/0000-0002-6749-3909
Minyukova Anna D., postgraduate student of the Department of "Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures", National Transport University, e-mai: anyminyukov@gmail.com, +380958395152, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1. https://orcid.org/0000-0002-1830-0189

Abstract. The article is dedicated to analyzing the technical condition of reinforced concrete superstructures of road bridges in Ukraine, identifying key degradation factors, and substantiating the necessity of strengthening measures to improve their durability and reliability. The study highlights the growing problem of aging bridge infrastructure, focusing on corrosion, fatigue damage, and material wear as primary causes of structural deterioration. Particular attention is given to the consequences of exceeding the design service life and the associated risks for traffic safety.

Objective. To conduct a comprehensive analysis of the current state of reinforced concrete superstructures of road bridges in Ukraine, determine the main degradation factors, and justify the necessity of strengthening superstructure elements to enhance their durability and reliability.

Methodology. The research is based on the analysis of statistical data on bridge conditions, case studies of structural failures, and theoretical modeling of degradation processes. Particular emphasis is placed on the impact of corrosion on reinforcement, fatigue-induced cracks, and load-bearing capacity reduction. Advanced diagnostic techniques, including non-destructive testing and computational simulations, are considered to assess structural integrity accurately.

Results. The study establishes that a significant proportion of reinforced concrete superstructures requires urgent strengthening due to critical loss of load-bearing capacity. It is revealed that many bridges, built in the mid-20th century, no longer meet modern operational and safety requirements. The findings indicate that fatigue damage and stress accumulation in structural elements are not sufficiently studied, necessitating further research into failure mechanisms. The analysis suggests that implementing innovative reinforcement techniques, such as external adaptive tensioning, could significantly extend the service life of aging bridge structures.

Conclusion. Addressing the problem of aging reinforced concrete superstructures is crucial for ensuring road safety and prolonging the operational lifespan of bridges. The study underscores the importance of timely strengthening interventions, considering modern material technologies and advanced structural monitoring methods. Further research into fatigue properties and degradation mechanisms will provide valuable insights for developing effective rehabilitation strategies.

Keywords: Reinforced concrete superstructures, structural durability, fatigue damage, service life, technical condition.

References

1. Kaskiv, V.I., Panibratets, L.H., Stepanov, S.M., Hryniv, V.S., Chaykovska, L.I. "The State of Bridge Economy in Ukraine on Roads of National Importance in Controlled Territories for 2023."
2. Bilchenko, A.V., Kislov, O.H., Synkovska, O.V., Ihnatenko, A.V. "Durability of Reinforced Concrete Structures as the Basis of the Life Cycle of Bridge Structures."

3. Strakhova, N.Ye., Holubiev, V.O., Kovalov, P.M. *Exploitation and Reconstruction of Bridges*, 2nd ed., revised, Kyiv: 2002. 408 p., ill. Edited by Lantukh-Lyashenko, A.I.
4. DSTU 9181:2022 *Guidelines for Assessing and Predicting the Technical Condition of Road Bridges*. Kyiv, 2022. 32 p. (Information and Documentation).
5. RV.3.2-03450778-832:2013 *Recommendations for Designing Monolithic Pre-stressed Bridges with Concrete Tension (Post-tensioned Systems)*. Kyiv, 2013.
6. RV.3.2-218-03450778-741:2008 *Recommendations for Reinforcing Bridge Structures under Load, Including Adjusting Forces*. Kyiv, 2008.
7. Yermakova, I.A., Nechyporenko, M.V. *Prospective Calculating Loads for Bridges on Motor Roads*.
8. Lantukh-Lyashenko, A.I. "A Model for Determining the Reliability of Bridge Superstructures under Conditions of Incomplete Information" *Collection 'Roads and Road Construction'*, Issue 62. Kyiv, 2001.
9. Lantukh-Lyashenko, A.I. "Assessment of Structure Reliability Using the Markovian Stochastic Process Model with Discrete States" *Collection 'Roads and Road Construction'*, Issue 57, 1999, pp. 183-188.
10. Dehtiar, V.H. "On the Problem of Estimating Wear of Bridge Elements" / V.H. Dehtiar, A.I. Lantukh-Lyashenko. *Collection 'Roads and Road Construction'*, Issue 59. Ukrainian Transport University. Kyiv, 2000, pp. 33-36.
11. DBN V.2.3-22:2009 *Bridges and Pipes. Basic Design Requirements*.
12. Borschov, V.I., Zakora, O.L. *Bridges and Pipes. Textbook. Volume 2. Reinforced Concrete Bridges*. Dnipro: DNUZT Publishing House, 2012. 393 p.
13. Popovych, M.M., Myroniuk, O.S., Borščov, V.I. *Strengthening of Reinforced Concrete Beam-type Bridge Structures Using Spindles and Pre-stressed Bars*.
14. Thuraichamy Guganesan Suntharavadivel, Thiru Aravinthan *Overview of External Post-tensioning in Bridges.*

УДК 625.7
UDC 625.7

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-041-050

ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ТЕПЛОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF WARM ASPHALT CONCRETE



***Бондаренко Людмила Петрівна**, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: luda_bond@ukr.net, тел.+380442803942,*

https://orcid.org/0000-0002-8239-065X



***Крюковський Олександр Миколайович,** аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету, e-mail: kriukovsky@gmail.com, тел.+380442803942*

https://orcid.org/0009-0009-7730-0486

Анотація. Оцінка життєвого циклу (ОЖЦ) – це системна методологія, яка використовується для оцінки потенційного впливу на навколишнє середовище та пов'язана з усіма етапами виробництва продукту або системи. Основна мета ОЖЦ полягає у комплексному вивченні та документуванні екологічних аспектів і потенційного впливу продукту, процесу чи послуги на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу – від видобутку сировини до утилізації. Це дозволяє виявити можливості для зменшення впливу, покращити екологічний профіль продукту, підтримати екосертифікацію та прийняття обґрунтованих рішень.

У статті розглядається оцінка життєвого циклу теплого асфальтобетону як сучасної альтернативи традиційному гарячому асфальтобетону. Для об'єктивного оцінювання ефективності технологій теплого асфальтобетону проаналізовано повний життєвий цикл дорожнього покриву, що включає у себе основні його етапи: добування та транспортування сировини, виготовлення суміші, її транспортування і укладання, експлуатацію, технічне обслуговування, а також утилізацію або рециклінг матеріалу. В роботі досліджені основні процеси життєвого циклу теплого асфальтобетону та визначені переваги і недоліки на кожному етапі. Особливу увагу приділено перевагам технології теплого асфальтобетону з точки зору зниження енергоспоживання та викидів парникових газів. Наведено рівняння термодинамічної рівноваги для визначення енергоспоживання під час виготовлення асфальтобетонних сумішей. Проаналізовано вплив основних етапів життєвого циклу асфальтобетону на навколишнє середовище. Визначено чинники, що стримують широке впровадження технологій теплого асфальтобетону в Україні.Проведено порівняння існуючих технологій виготовлення асфальтобетонів, визначено основні проблеми та сформульовано рекомендації щодо впровадження

теплих асфальтобетонів у дорожньому будівництві. Оцінка за методологією життєвого циклу підтвердила, що впровадження теплого асфальтобетону дозволяє досягти суттєвого зниження загального вуглецевого сліду дорожнього покриву без втрати його експлуатаційних властивостей.

Ключові слова. Асфальтобетонна суміш, **т**еплий асфальтобетон, гарячий асфальтобетон, життєвий цикл, екологічна оцінка, енергоефективність, дорожній покрив, викиди CO_2, декарбонізація дорожнього будівництва, повторне використання матеріалів, рециклінг.

Вступ. У сучасних умовах впровадження сталого розвитку, глобального потепління та посилення екологічних вимог як на національному, так і на міжнародному рівнях, дорожнє будівництво зазнає суттєвих трансформацій. У центрі уваги опиняються не лише техніко-економічні показники дорожніх покривів, а й їхній вплив на довкілля протягом усього періоду існування — від видобування сировини до утилізації або повторного використання матеріалів. Саме тому дедалі більшої актуальності набуває впровадження нових, екологічно орієнтованих технологій, що дозволяють знизити рівень енергоспоживання, зменшити викиди парникових газів і зберегти природні ресурси.

Одним із перспективних напрямів у цій галузі є застосування теплого асфальтобетону — технології, яка передбачає зниження температури виготовлення та укладання асфальтобетонної суміші на 20–40 °С порівняно з традиційним гарячим асфальтобетоном. Такий підхід забезпечує не лише покращення умов праці дорожніх робіт і подовження будівельного сезону, а й сприяє зменшенню споживання палива, викидів CO_2 та інших шкідливих речовин в атмосферу.

Разом з тим, для об’єктивного оцінювання ефективності технологій теплого асфальтобетону недостатньо обмежуватись аналізом окремих характеристик, таких як зниження температури чи витрати енергії на виготовлення. Необхідно розглядати повний життєвий цикл дорожнього покриву — комплексну методологію, яка враховує всі етапи: добування та транспортування сировини, виготовлення суміші, її транспортування і укладання, експлуатацію, технічне обслуговування, а також утилізацію або рециклінг матеріалу.

Проведення оцінки життєвого циклу дає змогу визначити реальні переваги або недоліки тієї чи іншої технології з урахуванням впливу на довкілля, енергозатратність, тривалість експлуатації, технічне обслуговування та інші чинники. Це особливо важливо в контексті інтеграції України у європейське інфраструктурне середовище, де подібні підходи вже стали нормою під час розроблення дорожніх проєктів.

Таким чином, проведення оцінки життєвого циклу теплого асфальтобетону є надзвичайно актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору, адже дозволяє приймати більш зважені рішення щодо впровадження нових матеріалів і технологій у дорожнє будівництво.

Постановка проблеми. Технології теплих асфальтобетонів вже стали частиною стандартної практики в США, Канаді, країнах Європейського Союзу (Німеччина, Франція, Швеція, Нідерланди)**.** У США, згідно з даними National Asphalt Pavement Association, понад 40% всіх сумішей у 2022 році виготовлялись за технологією теплого асфальтобетону [1].

В Україні застосування теплих асфальтобетонів перебуває на стадії впровадження. Використання технології відбувається переважно в рамках пілотних або демонстраційних проєктів за участю міжнародних підрядників або донорських організацій (наприклад, у проєктах реконструювання доріг за підтримки ЄБРР та Світового банку).

Дослідженню методичних засад оцінки ефективності використання теплих асфальтобетонів присвячені наукові праці таких вітчизняних вчених: Савенко В.Я., Мудриченко А.Я., Радовский Б.С, Кіщинський С.В., Кириченко Л.Ф., Копинець І. В. та ін. Науковці розглядають теплу технологію як перспективну альтернативу традиційним гарячим асфальтобетонам, які дозволять знизити енергоспоживання, скоротити викиди парникових газів та покращити умови праці під час укладання дорожнього полотна. [2-6] Але, попри значні напрацювання в частині окремих показників, таких як: температура ущільнення, щільність, тріщиностійкість або економічна доцільність впровадження, сучасні дослідження потребують системного підходу, що враховує весь життєвий цикл дорожнього

покриву: від отримання ресурсної бази, транспортування сировини та виготовлення суміші до експлуатації, ремонту та рециклінгу.

Отже, не враховуючи потенційні переваги теплих асфальтобетонів, їх широке впровадження стримується рядом чинників:

- недостатня нормативна база в Україні;
- відсутність чітких методик оцінки життєвого циклу дорожніх матеріалів;
- невеликий досвід експлуатації теплих асфальтобетонів в українських кліматичних умовах;
- висока вартість імпортних добавок для теплих асфальтобетонів.

Тому, існує потреба у дослідженні підходів до життєвого циклу теплого асфальтобетону в рамках національних стандартів та проєктування.

Мета роботи. Метою дослідження є проведення оцінки життєвого циклу теплого асфальтобетону з урахуванням екологічних, енергетичних та експлуатаційних параметрів.

Завданнями дослідження є:

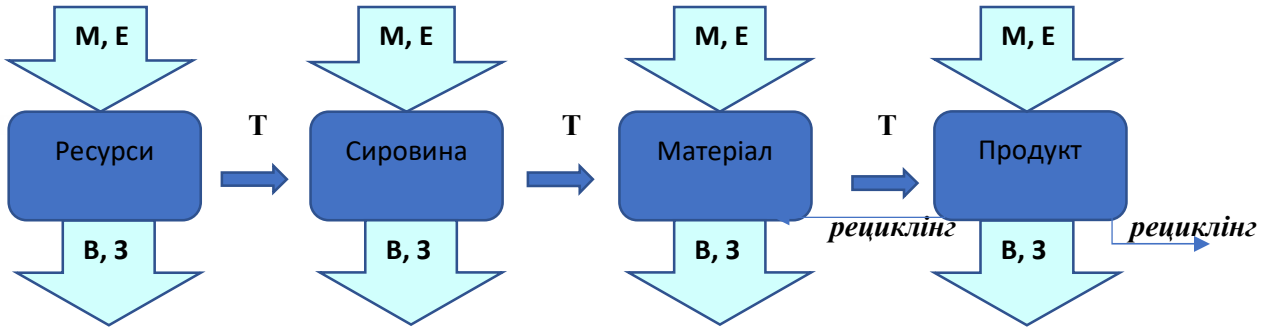
- проаналізувати етапи життєвого циклу теплого асфальтобетону;
- визначити технологічні переваги та потенційні обмеження теплих асфальтобетонів;
- розробити рекомендації щодо впровадження методології оцінки життєвого циклу.

Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів. На відміну від традиційного гарячого асфальтобетону, теплий асфальтобетон виготовляється за знижених температур — зазвичай 100–140 °C, залежно від типу технології (органічні добавки, хімічні модифікатори або спінення бітуму) [7]. Таке зниження температури суттєво впливає на реологічні властивості бітумного в'яжучого, проникність суміші, ступінь ущільнення та інші фізико-механічні параметри, які впливають на довговічність дорожнього покриву [6].

У межах дослідження проаналізовано основні фази життєвого циклу теплого асфальтобетону відповідно до методології оцінки життєвого циклу, яка передбачає системний підхід щодо оцінювання впливу матеріалу на довкілля протягом усього періоду його існування — від видобутку сировини до утилізації. [8].

Основні етапи дослідження системи (дорожнього покриву) представлені на рисунку 1. Вони включають чотири фази життєвого циклу дорожнього покриву:

1) ресурси – добування, виготовлення і транспортування ресурсів для сировини;
2) сировина – виготовлення сировини та транспортування до змішувальної установки;
3) матеріал – виготовлення асфальтобетонної суміші на змішувальній установці;
4) продукт – транспортування суміші до будівельного майданчика та будування дорожнього покриву.



Умовні познаки: М — матеріальні потоки, Е — енергетичні потоки, В — відходи, З — забруднення, Т — транспорт.

Рисунок 1 — Фази життєвого циклу теплого асфальтобетону

Figure 1 — Phases of the life cycle of warm asphalt concrete

1. **Фаза добування ресурсів** (щебеню, піску, бітуму, добавок та паливно-енергетичних ресурсів) є початковим етапом життєвого циклу теплого асфальтобетону. Вона включає сукупність процесів, пов'язаних із добуванням, первинним обробленням та транспортуванням природних ресурсів, необхідних для виготовлення компонентів асфальтобетонної суміші. Ця фаза має суттєве екологічне навантаження, зокрема через споживання енергії, утворення викидів та втручання у природні ландшафти.

Однією із переваг цієї фази є не великий обсяг енергії, який компенсується на наступних фазах, а саме: не великі енергетичні витрати на етапах виготовлення й укладання суміші, які знижують загальне навантаження на ресурси; можливість оптимізації постачання ресурсів — наприклад, скорочення потреби в паливі. Наступною перевагою є можливість зменшення загального обсягу видобутих ресурсів завдяки нижчому температурному старінню бітуму, що дозволяє застосовувати повторне використання теплого асфальтобетону — це сприяє зменшенню обсягів первинного видобутку. Використання відновлених добавок є наступною перевагою теплого асфальтобетону: використання біовосків або промислових побічних продуктів (наприклад, з целюлозної або хімічної промисловості) для заміни природних ресурсів.

Недоліком даної фази є значне споживання природних ресурсів. Незважаючи на загальну екологічну ефективність теплого асфальтобетону, на фазі добування ресурсів обсяги використання щебеню, піску, бітуму та пального залишаються значними і майже подібними з гарячим асфальтобетоном. Видобуток ресурсів також супроводжується порушенням ландшафтів, деградацією ґрунтів, шумовим та пиловим забрудненням. Виробництво бітуму і багатьох хімічних добавок для теплого асфальтобетону засноване на нафтопродуктах — це поглиблює залежність від невідновлюваних джерел. Кар'єрні роботи, транспорт, подрібнення, сушка та інші операції потребують великої кількості дизельного пального або електроенергії, що зумовлює високий рівень викидів CO_2 на цьому етапі. У разі імпорту спеціалізованих добавок для теплого асфальтобетону зростають логістичні витрати, а також непрямі екологічні впливи (викиди від транспортування, упаковка, утилізація залишків).

2. Фаза сировина життєвого циклу теплого асфальтобетону характеризується технологічним процесом транспортування компонентів, що значно впливає на якість кінцевого дорожнього покриву. У цій частині дослідження розглянуто основні переваги та недоліки транспортування. Основною перевагою є зниження температурного режиму транспортування за температур 100–140 °C, що на 30–50 °C нижче, порівняно з гарячим асфальтом. Це сприяє зменшенню енерговитрат на підігрів і скорочує теплові втрати під час перевезення. Знижена температура транспортування зменшує ризики термічного ураження працівників, а також знижує інтенсивність випаровування шкідливих речовин (парів бітуму), покращуючи екологічну безпеку. Менша температура зменшує ступінь налипання суміші на металеві поверхні кузовів, що полегшує вивантаження і знижує втрати матеріалу. Завдяки використанню модифікуючих добавок, тепла асфальтобетонна суміш зберігає пластичність довше, що дозволяє перевозити її на відстані до 100 км без суттєвої втрати якості. Загальне зниження температур на всіх етапах виробничо-технологічного циклу сприяє зменшенню викидів парникових газів (CO_2, NO_x) під час транспортування.

Головний недолік під час транспортування теплої асфальтобетонної суміші у прохолодну погоду або за сильного вітру — швидка втрата тепла, що може призвести до зниження її технологічної придатності вже на етапі транспортування. Забезпечення стабільності властивостей суміші потребує використання дорогих хімічних або органічних добавок, що ускладнює логістику постачання та підвищує загальні витрати. В Україні та ряді країн відсутні чіткі ДСТУ або інструкції з транспортування бітуму з теплоактивними добавками, що може ускладнювати логістику та контроль якості. Для збереження температури рекомендується використовувати термоізольовані самоскиди, що не завжди є доступними, особливо у віддалених регіонах. Навіть незначні відхилення від заданих температур можуть негативно вплинути на реологічні властивості суміші, тому під час транспортування необхідне використання термодатчиків або GPS-моніторингу.

3. Фаза матеріал. Тепла асфальтобетонна суміш є композитним будівельним матеріалом, до складу якого входять: мінеральні заповнювачі (щебінь, пісок, мінеральний порошок); бітумне в'яжуче (дорожній бітум, за необхідності модифікований полімером, або використаний у спіненій формі); модифікуючі добавки (органічні воски (наприклад, Sasobit), поверхнево-активні речовини (ПАР), біодобавки). Фізико-хімічна взаємодія між зазначеними компонентами дозволяє забезпечити укладання суміші за знижених температур (100–140 °C), зберігаючи, або навіть покращуючи експлуатаційні характеристики дорожнього покриву. Виробництво теплих асфальтобетонних сумішей здійснюється на асфальтозмішувальних установках аналогічно до традиційних гарячих сумішей, але з дотриманням нижчих температурних режимів.

Переваги. Зниження температури змішування до 100–140 °C дозволяє: зменшити енергоспоживання на заводі (до 30%); знизити викиди CO_2, NO_x та летких органічних сполук; зменшити зношення обладнання шляхом зменшення теплового навантаження (табл. 1). Можливість використання вторинних матеріалів у більшій кількості без втрати якості. Поліпшення умов праці персоналу через зниження рівня температури, шуму та шкідливих парів.

Недоліки. Необхідність адаптації обладнання (наприклад, введення модифікуючих добавок у бітум або змішувач). Вища чутливість щодо дозування добавок — неправильне введення може порушити технологію. Потреба у додатковому контролі температурного режиму, оскільки перевищення або зниження температур може зруйнувати структуру суміші.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика гарячої та теплої асфальтобетонної суміші за основними техніко-екологічними показниками

Table 1 – Comparative characteristics of hot and warm asphalt concrete mix according to the main technical and environmental indicators

Показник	Асфальтобетонна суміш	
	гаряча	тепла
Температура укладання, °C	140–180	100–140
Енергоспоживання, МДж/тонну	~250	~180
Викиди CO_2, кг/тонну	35–40	20–28
Довговічність покриву, років	10–15	12–17
Можливість повторного використання	Обмежена	Вища

Використання теплої асфальтобетонної суміші є перспективним технологічним напрямом, що забезпечує значні переваги в енергозбереженні, екологічності та безпеці виробничих процесів. Однак, для реалізації її потенціалу необхідне забезпечення точного контролю на кожному етапі — від фазового складу та температур змішування до умов транспортування. Переваги теплих асфальтобетонів на етапах виготовлення і транспортування здатні компенсувати потенційні технологічні обмеження за умови дотримання регламентованих температурних та логістичних параметрів.

4. Фаза продукт. Переваги теплого асфальтобетону особливо помітні на етапі укладання. Зниження температури на 20–40 °C призводить до зменшення викидів шкідливих речовин на робочому майданчику, що сприяє покращенню умов праці. Крім того, нижча температура сприяє енергоощадному ущільненню суміші та дозволяє продовжити сезон дорожніх робіт у холодніші періоди. У результаті знижується експлуатаційний тиск на дорожні організації. Теплий асфальтобетон демонструє схожі, або покращені показники довговічності та стійкості до утворення тріщин порівняно з гарячим асфальтобетоном. Наявність добавок забезпечує кращу адгезію між мінеральним скелетом і бітумом, а також знижує ризик відшарування при дії води. Це дозволяє зменшити частоту ремонтів і подовжити міжремонтні інтервали, що позитивно впливає на загальний екологічний баланс. З огляду на кращі адгезійні властивості теплого асфальтобетону, покриви з його використанням легше

піддається рециклінгу. Знижені температури в процесі первинного виготовлення зменшують термічне старіння бітуму, що полегшує його повторне використання. Це зменшує потребу у новій сировині та забезпечує циркулярність у дорожньому будівництві. Наприкінці життєвого циклу матеріал може бути або утилізований, або повторно використаний. Завдяки нижчим ступеням окиснення та старіння, асфальтобетон, виготовлений за технологією теплого асфальтобетону краще піддається вторинній переробці. Це сприяє зниженню кількості будівельних відходів та зменшенню загального впливу на навколишнє середовище.

Таким чином, на кожному із етапів життєвого циклу теплого асфальтобетону ця технологія має як певні переваги, так і недоліки, які проаналізовано та наведено у таблиці (табл.2).

Таблиця 2 – Система життєвого циклу теплого асфальтобетону
Table 2 – Life Cycle System of Warm Asphalt Concrete

Фаза	Процес	Переваги	Недоліки
Ресурси	Добування і виробництво ресурсів для сировини	- менший обсяг енергії, що компенсується на наступних фазах; - можливість зменшення загального обсягу видобутих ресурсів; - інтенсифікація використання відновлюваних/відходних добавок.	- високе споживання природних ресурсів; - залежність від нафтохімічної сировини; - енергомісткість видобутку; - вартість та складність логістики добавок.
Сировина	Транспорту-вання компонентів для суміші асфальто-бетонної	- зниження температурного режиму транспортування; - підвищення безпеки та поліпшення умов праці; - зменшення налипання суміші на транспортні засоби; - можливість транспортування на більші відстані; - екологічна ефективність.	- температурна чутливість до умов довкілля; - висока залежність від модифікуючих добавок; - необхідність спеціального транспорту; - потреба в постійному контролі температурного режиму.
Матеріал	Виробництво асфальто-бетонної суміші Транспорту-вання готової суміші	- зниження температури змішування до 110–140 °С; - можливість використання вторинних матеріалів (РАП); - поліпшення умов праці персоналу.	- вартість добавок; складність контролю їх дозування; - необхідність адаптації обладнання; чутливість до технологічних відхилень; - температурна чутливість; потреба в термоізоляції; - обмежений час укладання.
Продукт	Укладання та ущільнення покриву Експлуатація покриву Ремонт та рециклінг покриву	- енергозбереження; - зменшення викидів забруднюючих речовин; - покращення умов праці; - підвищення гнучкості укладання; - розширення температурного діапазону застосування; - можливість підвищення частки вторинних матеріалів.	- вартість добавок; - висока чутливість до технологічного режиму; - необхідність адаптації обладнання; - обмеження щодо несумісності матеріалів; - залежність від кліматичних умов; - відсутність уніфікованих стандартів.

Таким чином, аналіз життєвого циклу теплого асфальтобетону демонструє, що ключові екологічні та енергетичні переваги зосереджені на етапах виготовлення, транспортування, укладання та рециклінгу. Оцінка за методологією життєвого циклу підтверджує, що впровадження теплого асфальтобетону дозволяє досягти суттєвого зниження загального вуглецевого сліду дорожнього покриву без втрати експлуатаційних властивостей. Урахування цих чинників є критично важливим для переходу до сталої інфраструктури. Загальна сума вуглецевого сліду асфальтобетонного покриву виражається в рівнянні (1) наступним чином:

$$\sum_{i=1}^{n}(CO_2e)i = \sum_{i=1}^{n}(AD_i \cdot x \cdot EF_i \cdot x \cdot G\omega p_i) \quad (1)$$

де CO_2e — викиди вуглецевого еквівалента в результаті однієї процедури асфальтобетонного покриву;
AD _ дані про діяльність;
EF — коефіцієнт викидів вуглецю;
$G\omega\ p$ — потенціал глобального потепління.

Споживання енергії під час виготовлення асфальтобетонної суміші в основному включає споживання палива та електроенергії. Для теплої асфальтобетонної суміші енергоспоживання розраховується з використанням рівнянням термодинамічної рівноваги:

$$M \cdot q \cdot \lambda \cdot \eta = \sum_i c_i m_i \cdot \left(T_f - T_i\right) + c_W m_W \cdot (T_W - T_i) + L_W m_W \quad (2)$$

де M – вага палива (кг); q – теплотворна здатність палива (Дж/кг);
λ – коефіцієнт згоряння; η – коефіцієнт теплообміну обладнання;
n – загальна кількість типів агрегатів; c_i – питома теплоємність i -го агрегату (Дж·кг $^{-1}$ °С);
m_i – вага i -го агрегату (кг);
T_i , T_f – відповідно початкова та кінцева температура агрегату (°С);
c_w – питома теплоємність води (4190 Дж·кг $^{-1}$ °С); m_w – вага води (кг);
T_w – температура кипіння води, 100°С; а L_w – прихована теплота пароутворення (2256 кДж/кг).

Паливо витрачається на нагрівання бітуму та сушіння заповнювача, тоді як будівельна техніка споживає електроенергію. Під час процесу сушіння та нагрівання заповнювача, утворюється велика кількість пилу, тоді як спалювання викопного палива призводить до викидів CO_2 . Крім того, під час змішування компонентів асфальтобетонної суміші виділяється багато шкідливих газів. У таблиці (табл.3) наведено порівняння загального споживання ресурсів під час виготовлення асфальтобетонних сумішей за різними технологіями. Бачимо, що споживання ресурсів для виготовлення теплих асфальтобетонних сумішей на 23,6% менше, ніж під час виготовлення гарячих сумішей.

Таблиця 3 – Індекси життєвого циклу виготовлення 1000 м³ гарячої та теплої асфальтобетонних сумішей.

Table 3 – Life cycle indices for the production of 1000 m³ of hot mix and warm mix asphalt concrete.

Тип споживання/викидів	Асфальтобетонна суміш	
	гаряча	тепла
Важке мазутне паливо (кг)	12955,44	9900,55
Електрика (кВт·год)	7988,77	6105.02
Дизельне паливо (кг)	291,33	222,63
CO_2 (кг)	45510	18204
NO_X (кг)	147,6	40,44
SO_2 (кг)	108,24	26,84
$PM_{2,5}$ (кг)	10.33	5.38

Отже, теплі асфальтобетонні суміші демонструють значний потенціал для зниження енерговитрат, підвищення екологічної безпеки та покращення умов праці в галузі дорожнього будівництва. Однак для повноцінного впровадження цієї технології необхідне подолання ряду технологічних та економічних бар'єрів, зокрема удосконалення нормативної бази, стандартизація добавок, а також модернізація обладнання.

Висновки і рекомендації. Результати проведеного дослідження підтверджують доцільність та перспективність застосування технології теплого асфальтобетону в умовах України. Зниження температури виготовлення та укладання на 20–40 °С порівняно з традиційними гарячими асфальтобетонними сумішами забезпечує істотне зменшення енергоспоживання та рівня викидів шкідливих речовин, зокрема парникових газів (CO_2, NO_x, SO_2), що має важливе значення в контексті боротьби зі зміною клімату та підвищенням екологічної безпеки. Застосування методології оцінки життєвого циклу дозволяє інтегрувати екологічні аспекти у процес ухвалення інженерних рішень, забезпечуючи комплексне порівняння традиційних і інноваційних дорожньо-будівельних технологій. Аналіз життєвого циклу дозволяє враховувати вплив на довкілля на всіх етапах життєвого циклу: від видобутку сировини до утилізації або повторного використання матеріалів.

З метою забезпечення широкого впровадження теплого асфальтобетону в Україні доцільно реалізувати такі рекомендації:

- розробити та впровадити національні нормативно-технічні документи, що регламентують застосування теплих асфальтобетонів з урахуванням місцевих кліматичних, транспортних та екологічних особливостей. До складу нормативів необхідно включити вимоги щодо енергоспоживання, екологічних характеристик та довговічності покривів;
- ініціювати пілотні проєкти та системні польові випробування з метою оцінки ефективності різних типів добавок і технологічних схем виготовлення теплих асфальтобетонів у реальних умовах експлуатації. Такі дослідження сприятимуть адаптації світового досвіду до українського контексту;
- сформувати національну базу даних параметрів для досліджень життєвого циклу дорожньо-будівельних матеріалів, яка міститиме дані про сировину, енергетичні витрати, викиди, відходи, логістичні ланцюги тощо. Це забезпечить наукову обґрунтованість проєктних рішень та дозволить проводити порівняльний аналіз альтернатив.
- сприяти розвитку внутрішнього ринку добавок для теплих асфалтобетонів, у тому числі шляхом стимулювання імпорту, локалізації виробництва або створення спільних підприємств із провідними світовими виробниками. Це дозволить знизити собівартість технології та підвищити її доступність для дорожньо-будівельних підприємств;
- розгорнути інформаційно-освітні програми для фахівців галузі, спрямовані на поширення знань щодо переваг та особливостей впровадження теплих асфальтобетонів. Така діяльність сприятиме формуванню попиту на екологічно доцільні технології та підвищенню загальної культури управління інфраструктурними проєктами.

Узагальнюючи зазначене, можна стверджувати, що перехід до використання технології теплого асфальтобетону в Україні відповідає сучасним викликам сталого розвитку та інтегрує країну у глобальні тенденції з декарбонізації дорожнього будівництва. Реалізація запропонованих заходів дозволить підвищити екологічну ефективність дорожніх проєктів, зменшити залежність від викопних ресурсів та оптимізувати витрати на експлуатацію дорожньої інфраструктури в середньо- та довгостроковій перспективі.

Подальші наукові дослідження теплих асфальтобетонів повинні бути спрямовані на:оптимізацію складу сумішей під різні кліматичні умови; дослідження довговічності покривів; розробку адаптивних технологічних карт для широкого впровадження теплих асфальтобетонів в практику.

Перелік посилань

1. National Asphalt Pavement Association (NAPA). *Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2022*. DOI:10.13140/RG.2.2.22994.1632

2. С. Кіщинський, Л. Кириченко, І. Волошина, Н. Любченко, Н. Бондар, Е. Гнатюк. Висновок про властивості теплого асфальтобетону McAsphaltEvotherm з добавкою «Evotherm-3G», Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П.Шульгіна, Київ 2009.

3. Мудриченко А.Я., Савенко В.Я Удосконалення технології будівництва асфальтобетонних шарів з використання теплих сумішей. Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». К.: НТУ, 2018. – Вип. 103, С. 075 – 083.

4. Копинець І. В., Соколова О. Б., Соколов О. В., Юнак А. Л. Вплив добавок на основі синтетичних восків на експлуатаційні та технологічні властивості бітумів // Дороги і мости. – 2019. – Вип. 19-20. – С. 107-116.

5. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я, Стасюк Т.О. Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування теплих асфальтобетонних сумішей для улаштування шарів дорожнього одягу Вісник Національного транспортного університету. Випуск 55. Київ, 2023. С. 240 – 246. URL: https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-240-246

6. Радовський Б.С. Технологія нового теплого асфальтобетону у США, Дорожня техніка, 2008 р.

7. Giani, M.I., et al. *Comparative LCA of warm and hot mix asphalt*. Journal of Cleaner Production, 2015.

8. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.

9. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови

10. ДСТУ EN 13108-1:2018 Бітумомінеральні суміші. Технічні умови. Частина 1. Асфальтобетон (EN 13108-1:2016, IDT)

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF WARM ASPHALT CONCRETE

Bondarenko Liudmyla P., PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, National Transport University, Professor of Department of Transport Construction and Property Management, luda_bond@ukr.net, тел.+380442803942, https://orcid.org/0000-0002-8239-065X

Kriukovsky Oleksandr M., postgraduate student of the Department of Transport Construction and Property Management of the National Transport University, e-mail: kriukovsky@gmail.com ,
tel.+380442803942, https://orcid.org/0009-0009-7730-0486

Summary. Life cycle assessment (LCA) is a systematic methodology used to assess the potential environmental impact associated with all stages of the production of a product or system. The main purpose of LCA is to comprehensively study and document the environmental aspects and potential impact of a product, process, or service on the environment throughout its life cycle, from raw material extraction to disposal. This allows opportunities for reducing impact to be identified, the environmental profile of the product to be improved, eco-certification to be supported, and informed decisions to be made.

The article considers the assessment of the life cycle of warm asphalt concrete as a modern alternative to traditional hot asphalt concrete. To objectively evaluate the effectiveness of warm asphalt concrete technologies, the entire life cycle of road pavement is analyzed, including its main stages: extraction and transportation of raw materials, mixture production, transportation and laying, operation, maintenance, and disposal or recycling of the material. The paper examines the main processes of the warm asphalt concrete life cycle and identifies the advantages and disadvantages at each stage. Particular attention is paid to the advantages of warm asphalt concrete technology in terms of reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. Thermodynamic equilibrium equations are presented to determine energy consumption during the production of asphalt concrete mixtures. The impact of the main stages of the asphalt concrete life cycle on the environment has been analyzed. Factors hindering the widespread introduction of warm asphalt concrete technologies in Ukraine have been identified. A comparison of existing asphalt concrete manufacturing technologies has been carried out, the main problems have been identified, and recommendations for the introduction of warm asphalt concrete in road construction have been formulated. The life cycle assessment

confirmed that the introduction of warm asphalt concrete allows for a significant reduction in the overall carbon footprint of road pavement without losing its operational properties.

Keywords: Asphalt concrete mix, warm asphalt concrete, hot asphalt concrete, life cycle, environmental assessment, energy efficiency, road pavement, CO_2 emissions, decarbonization of road construction, reuse of materials, recycling.

References

1. National Asphalt Pavement Association (NAPA). Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2022. DOI:10.13140/RG.2.2.22994.1632

2. S. Kishchinsky, L. Kyrychenko, I. Voloshyna, N. Lyubchenko, N. Bondar, E. Hnatyuk. Conclusion on the properties of warm asphalt concrete McAsphaltEvotherm with the additive "Evotherm-3G", State Road Research Institute named after M.P. Shulgin, Kyiv 2009.

3. Mudrychenko A.Ya., Savenko V.Ya. Improvement of the technology of construction of asphalt concrete layers using warm mixtures. Scientific and technical collection “Highways and road construction”. K.: NTU, 2018. – Issue 103, pp. 075 – 083.

4. Kopynets I. V., Sokolova O. B., Sokolov O. V., Yunak A. L. The influence of additives based on synthetic waxes on the operational and technological properties of bitumen // Roads and Bridges. – 2019. – Issue 19-20. – P. 107-116.

5. Savenko V.Ya., Mudrychenko A.Ya., Stasyuk T.O. Feasibility study of the feasibility of using warm asphalt concrete mixtures for arranging road pavement layers Bulletin of the National Transport University. Issue 55. Kyiv, 2023. P. 240 – 246. URL: https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-240-246

6. Radovsky V.S. Technology of new warm asphalt concrete in the USA, Dorozhnaya tekhnika, 2008.

7. Giani, M.I., et al. Comparative LCA of warm and hot mix asphalt. Journal of Cleaner Production, 2015.

8. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.

9. DSTU B V.2.7-119:2011 Sumishi asfal′tobetonni i asfal′tobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Tekhnichni umovy

10. DSTU EN 13108-1:2018 Bituminous mixtures. Technical conditions. Part 1. Asphalt concrete (EN 13108-1:2016, IDT)

УДК 625.70
UDC 625.70

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-051-062

IMPACT OF DEFECTS AND DESTRUCTION ON THE CHANGE IN THE BEARING CAPACITY AND DURABILITY OF RIGID PAVEMENT STRUCTURES
Part 2. Assessment of the change in the coefficient of reduction of bearing capacity and deformability of road and airfield pavement

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ ТА РУЙНУВАНЬ НА ЗМІНУ НЕСНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ЖОРСТКИХ ПОКРИТТІВ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЙ
Частина 2. Оцінка зміни коефіцієнта зниження несної здатності та деформативності дорожнього та аеродромного покриття



***Igor Gameliak**, Sc.D., Professor, National Transport University, Head of department «System design of transport infrastructure objects and geodesy», e-mail: gip65@gmail.com, +380503524124, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovich Pavlenko str. 1, of. 346*

https://orcid.org/0000-0001-9246-7561



***Anna Kharchenko,** Sc.D., Professor, National Transport University, Professor of Transport Construction and Property Management Department, e-mail: anna-x3@ukr.net, tel. +380442807909, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovich Pavlenko str. 1, of. 323*

https://orcid.org/0000-0001-8166-6389



***Andij Dmytrychenko,** Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of Department Transport Law and Logistic, e-mail: andrew_d@ukr.net, +380502816006, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovich Pavlenko str. 1*

https://orcid.org/0000-0001-6144-7533

Summary. The article is devoted to the assessment of the influence of mechanical damage to cement concrete pavements on their overall modulus of elasticity and durability. It is noted that the destruction caused by vehicles and weather conditions reduces the modulus of elasticity of the road pavements. The studies described in the article show that on damaged road sections the average modulus of elasticity can be 1.9 times lower than on undamaged ones.

Various theoretical models and formulas are considered, in particular the Winkler-Zimmermann hypothesis and the Westergaard method, for calculating the stresses and deflections of slabs under loading in the center, at the edge and at the corner. The main type of failure of rigid road pavements is the chipping of the corners of the slabs, which is often observed in concrete without reinforcement. The analysis shows that the presence of a through crack can increase the deflection of the slab by 1.3-2.7 times.

The authors concluded that it is more logical to consider the destruction due to a decrease in the modulus of elasticity of cement concrete, rather than due to a decrease in the layer thickness. The article also analyzes the influence of the modulus of elasticity of the base on the deflection of the slab. The optimal value for highways is 120-150 MPa. A formula is proposed for calculating the coefficients of reduction to equivalent bearing capacity for destruction in the form of chipping of corners and edges of slabs.

Keywords: rigid road pavements, defects and destruction, cracks, transition coefficient, slab, deflection, bending moment

Presentation of the main material

The limiting bending moment m_u per unit cross-sectional width for concrete and reinforced concrete covers is determined by the formula [1]:

$$m_u = \frac{\gamma_c \cdot R_{btb} \cdot h^2 \cdot k_u}{6}, \quad (1)$$

where, γ_c – the coefficient of working conditions;

R_{btb} – the estimated value of tensile strength during concrete bending,

k_u – the fatigue coefficient:

$$k_u = 2 - 0{,}167 \cdot \lg(U_d), \quad (2)$$

here U_d is the given number of applications of the design axes of loads.

For rigid road pavements, the fatigue coefficient of concrete under repeated loading is determined by the formula:

$$k_y = 1{,}08 \cdot N_{pt}^{0{,}063}, \quad (3)$$

where N_{pt} - calculated total repetition of design loads for a service life of t years.

Ultimate (design) tensile strength of concrete in bending fatigue $R_{btb}(N_{pt})$ from the number of load cycles Npt is determined by the formula (A.1) [2]:

- for road pavements:

$$R_i^p = B_{btb} \cdot K_F \cdot 1{,}08 \cdot N_{pt}^{0{,}063} \cdot K_m, \quad (4)$$

where K_F – coefficient that takes into account the reduction in strength due to repeated freeze-thaw cycles, K_F = 0,95;

K_m – strength gain coefficient: for natural hardening concrete at air temperatures above 10 ºC K_m = 1.2; for natural hardening concrete at air temperatures below 10 ºC and during winter concreting K_m = 1.

- for airfield pavements [1]:

$$R_{btb}(N_{pt}) = \gamma_c \cdot R_{btb} \cdot (2 - 0{,}167 \lg(N_{pt})), \quad (5)$$

Despite the fact that different logarithmic (2) and power (3) dependences are used to calculate the limit condition (Fig. 1), taking into account the number of cycles to failure, almost the same value of the ultimate strength is obtained, taking into account fatigue (Fig. 2).

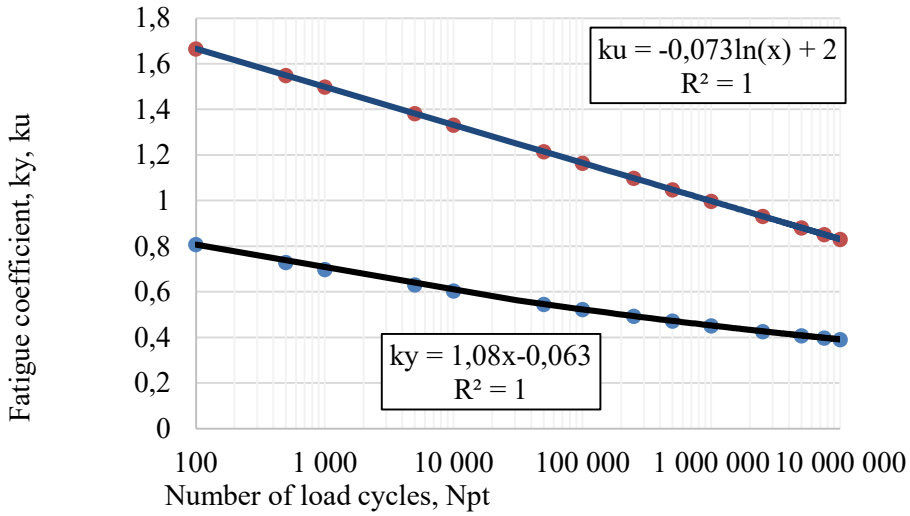


Figure 1 – *Dependence of fatigue coefficients k_y and ku on the number of load cycles N_{pt}*
Рисунок 1 *– Залежність коефіцієнтів втоми k_y та k_u від кількості циклів навантажень N_{pt}*

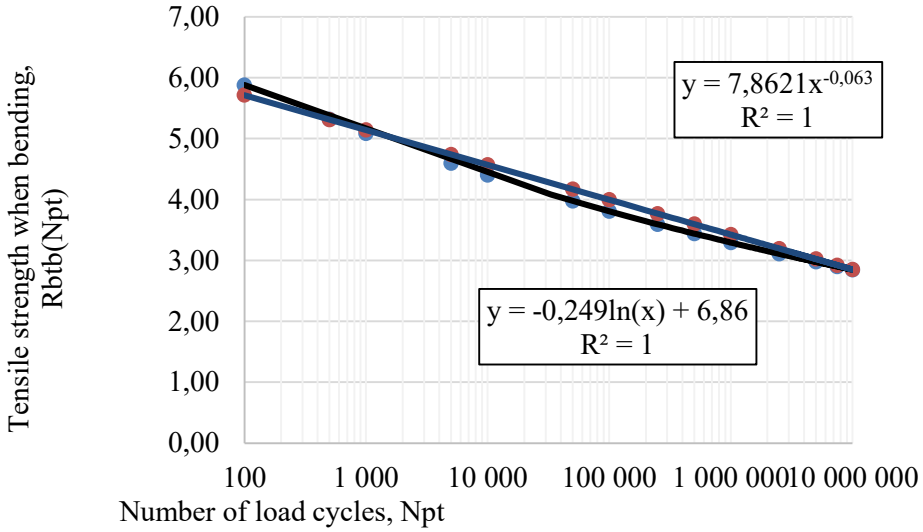


Figure 2 – *Dependence of ultimate fatigue strength $R_{btb}(N_{pt})$ on the number of loading cycles N_{pt}*
Рисунок 2 *– Залежність граничної міцності при втомі $R_{btb}(N_{pt})$ від кількості циклів навантажень N_{pt}*

Taking into account formulas (1 - 5) the number of cycles to failure (durability), is determined by the formula:

- for road pavements:

$$N_{pt} = R_{btb} \cdot (1 + 1{,}64V) K_F \cdot \left[\frac{1{,}08 \cdot R_{btb}}{\sigma_{r\,i,eg\ \text{або}\ corn}} \right]^{15{,}873} \cdot K_m, \tag{6}$$

- for airfield pavements:

$$N_{pt} = 10^{1/0{,}167 \cdot \left[2 - \frac{\sigma_{r_i,eg,corrn}}{\gamma_c \cdot R_{btb}} \right]}. \tag{7}$$

Formulas (6) and (7) allow calculating the durability of road and airfield concrete pavements for stresses n arising from the action of loads at the center, edge, and corner of the slab.

Solution of the problem. For a theoretical assessment of a possible increase in deflection and, accordingly, a decrease in the total modulus of elasticity of the pavement due to mechanical damage to the pavement, Prof. B.S. Radovsky considered the effect of a through crack on the deflection of a slab resting on an elastic base [3]. A slab with a crack was considered as a semi-infinite slab loaded near the edge along a circular platform, and a slab without a crack – as unlimited under the same load. Deflections under the center of a loaded circular sites are determined according to Westergaard's formulas [4, 5, 6, 7]. As a result, an expression is obtained to find the ratio of deflections:

$$k_w = \frac{w_b}{w_c} = \frac{4}{\sqrt{3}}\left(\frac{2+1,2\nu}{1-\nu^2}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\left(1-(0.76+0.4\nu)\overline{R}\right)^2}{1-\frac{\overline{R}^2}{8\pi}(\ln\frac{12(1-\nu^2)}{\overline{R}^4})+3)}, \quad (8)$$

where parameter $\overline{R}$ equal:

$$\overline{R} = \frac{3}{4(h_1/D)\left[\frac{E_1(1-\nu_2^2)}{E_2(1-\nu_1^2)}\right]^{1/3}}, \quad (9)$$

where w_b – deflection under the center of the loaded circular platform when loaded near the edge of the semi-limited slab on a Winkler base;

w_c – deflection under the center of the loaded circular platform on the pavement of the unlimited slab; h – plate thickness; E_1, E_2 and ν_1, ν_2 – respectively the modulus of elasticity of the material of the plate and the base and their coefficient of transverse deformation; P is the load.

According to the above formula, nomograms have been compiled, which make it possible to determine the effect of crack on the reduction of the bearing capacity of the structure of rigid and non-rigid road pavements in a wide range of changes in the input parameters E_1, E_2, h and D [4 -5].

Analysis the results of calculation.

For the analysis, the results of a specific calculation of the structure of the dry port cover under the action of a cover from a reach stacker weighing 100 - 120 tons were adopted. The equivalent load on one wheel is P=260 kN. Pressure in the pneumatics of the wheels is p=1.0 MPa. The diameter of the impression is D=0.575 m. The results of the analysis are given below (Fig. 3 – 5).

On the Fig. 5 change in the ratio of deflections are from the thickness of the slab for different modulus of elasticity of concrete E_1 (changes from the modulus of reinforced layers of 15000 MPa to the modulus of reinforced concrete E_1=45000 MPa) at the modulus of elasticity of the base E_2=150 MPa.

The deflection ratio does not increase linearly with an increase in the thickness of the slab and an increase in the modulus of elasticity of concrete. So, the calculation according to the formula (44) shows that with a change $\overline{R}$ from 0.1 to 0.4, the kw value changes from 2.7 to 1.3. Accordingly, if there is a through crack in the layers of the pavement and the base, then when loaded near it, the deflection increases by 1.3 - 2.7 times compared to rigid pavement without cracks, and to a greater extent, the lower the rigidity of these layers.

The modulus of elasticity of the base E_2 is of fundamental importance when its value is less than 160 - 250 MPa, where there is a transition from a rapid increase in deflection to its attenuation (Fig. 5). Which once again emphasizes the well-known fact about the need to provide a minimum modulus of elasticity under the surface of monolithic layers at the level of 120-150 MPa for roads.

For aerodrome pavements, as the analysis shows, the value of the modulus of elasticity of the base E_2 under the cement concrete slab, 180 – 250 MPa, depending on the load category and the thickness of the slab, is rational.

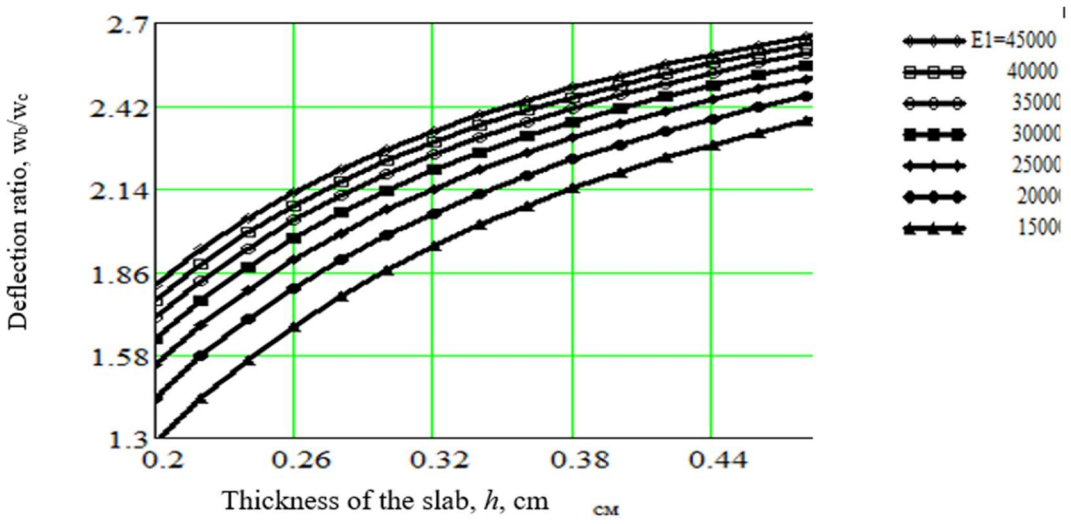


Figure 3 *– Change in the ratio of deflections*
Рисунок 3 *– Зміна коефіцієнта прогинів*

The analysis also shows that for each thickness of the pavement layer there is an optimal ratio between the modulus of elasticity of the pavement and the substrate, at which the ratio of deflections is minimal (Fig. 4).

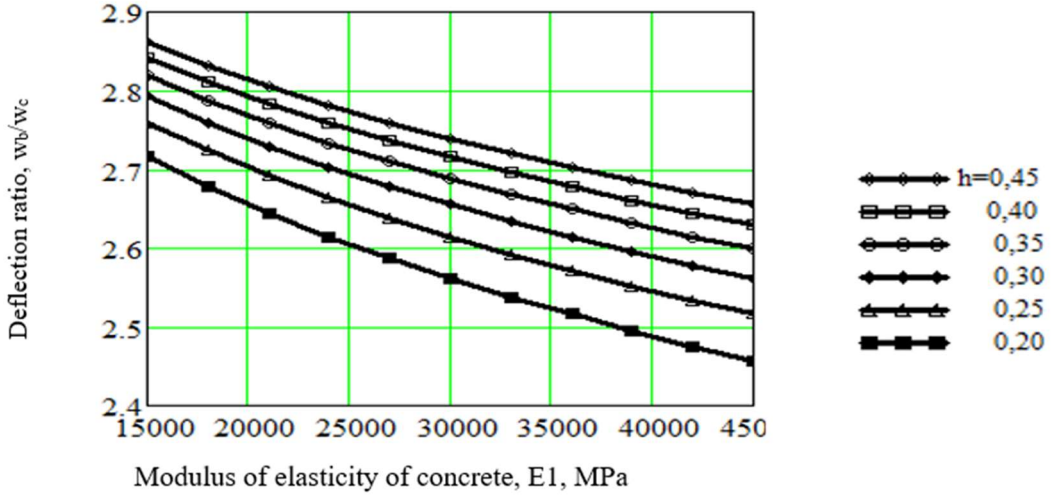


Figure 4 *– Change in the deflection ratio from the modulus of elasticity of concrete E_1 for the modulus of the base E_2=150 MPa at a slab thickness of 0.45, 0.40, 0.35, 0.30, 0.25 and 0.20 m, respectively*
Рисунок 4 *– Зміна коефіцієнта прогину від модуля пружності бетону E_1 для модуля основи E_2=150 МПа при товщині плити 0,45, 0,40, 0,35, 0,30, 0,25 та 0,20 м відповідно*

With an increase in the modulus of the base, the effect of cracking is less significant, which indicates the need to take into account the soil moisture of the roadbed when performing instrumental surveys of road pavement structures. An increase in the modulus of elasticity of the pavement leads to an increase in the effect of the crack on the decrease in bearing capacity.

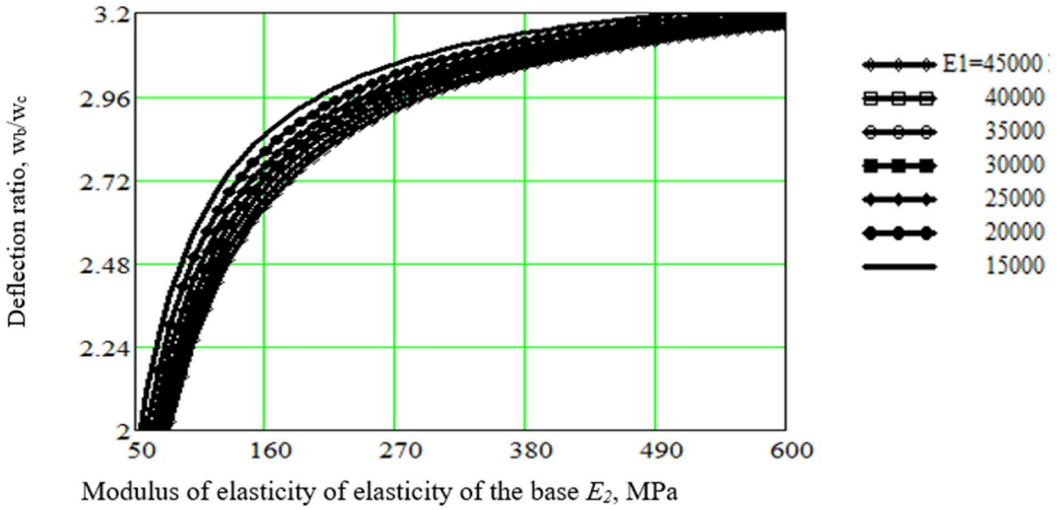


Figure 5 – *Change in the ratio of deflections depending on the modulus of elasticity of the base E_2, varying from 50 MPa to 600 MPa with a plate thickness of 0,35 m.*

Рисунок 5 – *Зміна коефіцієнта прогинів залежно від модуля пружності основи E_2, що змінюється від 50 МПа до 600 МПа при товщині плити 0,35 м.*

These results are quite consistent with the above experimental data.

In addition, the presence of destruction can be taken into account in the following ways:

1) due to a decrease in the thickness of the layer, similar to how it is done in SNiP 2.05.08.85;
2) due to a decrease in the modulus of elasticity of the pavement layer.

According to clause 5.68 of SNiP 2.05.08.85, when determining the stiffness and ultimate bending moment of concrete and reinforced concrete layers of pavement reinforcement, their design thickness t_{pd} should be taken depending on the category of destruction established according to Table. 25, and the thickness t_{ex} of the existing pavement at the destruction category:

$$\text{I} \rightarrow t_{pd}=t_{ex}; \quad \text{II} \rightarrow t_{pd}=0,9 \cdot t_{ex}; \quad \text{III} \rightarrow t_{pd}=0,8 \cdot t_{ex}. \tag{10}$$

Existing rigid pavements of the IV category of destruction in the calculation should be taken into account as artificial bases with a bed coefficient *of* K_s = 600 MPa/m^3 (60 kgf/cm^3).

Given that during operation, the thickness of the concrete slab does not change in the presence of cracks, it is more logical to take into account the destruction due to a decrease in the distributive capacity of the slab, i.e. due to the modulus of elasticity of cement concrete. Then, for the above categories of destruction, given that the cylindrical rigidity of concrete and aroma concrete sections is determined by the formula:

$$B = \frac{E_b \cdot h^3}{12 \cdot \left(1 - \nu^2\right)} = 0,085 \cdot E_b \cdot h^3 \quad , \tag{11}$$

Whence, equating to rigidity, it is obtained:

$$\text{I} \rightarrow E_{pd}=E_{ex}; \ \text{II} \rightarrow E_{pd}=0,9^3 \cdot E_{ex}=0,729 \cdot E_{ex}; \ \text{III} \rightarrow E_{pd}=0.8^3 \cdot E_{ex}= 0,512 \cdot E_{ex}. \tag{12}$$

When testing existing aerodrome structures, modern installations for measuring the deflection of falling cargo FWD or HWD should be used to establish real bearing capacity. The existing rigid pavements of the IV category of destruction will be taken into account in the calculation as artificial substrates with a characteristic value of the bedding coefficient:

$$K_{s_aaa} = K_{s_cp}\,(1 - 1,64 \cdot V), \tag{13}$$

where K_{s_cp} – is the average value of the modulus of elasticity or coefficient of the bed on the surface of the aerodrome pavements;

V – is the actual value of the coefficient of variation according to the test results.

In the first case, considering the effect of a defect in the form of a crack on the change in the cylindrical rigidity of the pavement, the transition coefficient K_h was obtained to calculate the decrease in the modulus of elasticity of a monolithic layer with cracks according to the formula:

$$K_h = \sqrt[3]{\frac{w_{in}}{w_{cr}}}, \tag{14}$$

where w_{in}, w_{cr} – respectively, the deflection of the pavement without defects and with defects that reduce its bearing capacity.

The equivalent thickness of the layer with h_{cr} defects will be determined by the formula:

$$h_{cr} = h_{in} \cdot K_h, \tag{15}$$

where h_{in} – the initial thickness of the monolithic layer.

$$K_E = \frac{w_{cr}}{w_{in}}$$

In the second case, to find the coefficient of reduction in the bearing capacity of the pavement using the formula (6.14 and 6.15) from [8]:

$$E_{заг}^{(i)} = \frac{\left[1{,}05 - 0{,}1\frac{h_i}{D}\left(1 - \sqrt[3]{E_{заг}^{(i+1)}/E_i}\right)\right]E_i}{0{,}71\sqrt[3]{\frac{E_{заг}^{(i+1)}}{E_i}}\,arctg\left(\frac{1{,}35h_{екв}}{D}\right) + \frac{E_i}{E_{заг}^{(i+1)}} \cdot \frac{2}{\pi}arctg\frac{D}{h_{екв}}}, \quad \text{where,} \quad \frac{h_{екв}}{D} = \frac{2h_i}{D}\sqrt[3]{\frac{E_i}{6E_{заг}^{(i+1)}}}, \tag{15}$$

where $E_1 = E_i$ – module of the pavement layer;

$E_2 = E_{заг}^{(i+1)}$ – the modulus of the base under the cement concrete pavement;

$h = h_i$ – the thickness of the pavement layer;

D – the diameter of the wheel imprint, the formula is obtained:

$$K_E = K_T^{c\cdot\ln(h)-d}, \tag{17}$$

where K_T is a coefficient that takes into account a decrease in the modulus of elasticity of the cement concrete pavement as a result of cracking of the layer:

$$K_T = \frac{E_{cr}}{E_{in}}, \tag{18}$$

where $c = 0.3359 + 0.0001 \cdot E_2$; $d = 0{,}3093 + 0{,}0007 \cdot E_2$.

According to the proposed formula (18), for different values of the modulus of elasticity of the base and the thickness of the pavement layer, the values of the coefficient of reduction of the bearing capacity of the structure K_E were calculated at different values of the coefficient of reduction of the modulus of elasticity of the K_T pavement. For example, Fig. 6 shows the values of the coefficient of reduction bearing capacity of the structure for the thickness of the pavement layer of h = 20, 25, 30, 35, 40 and 45 cm with the modulus of elasticity of the base of 150 MPa.

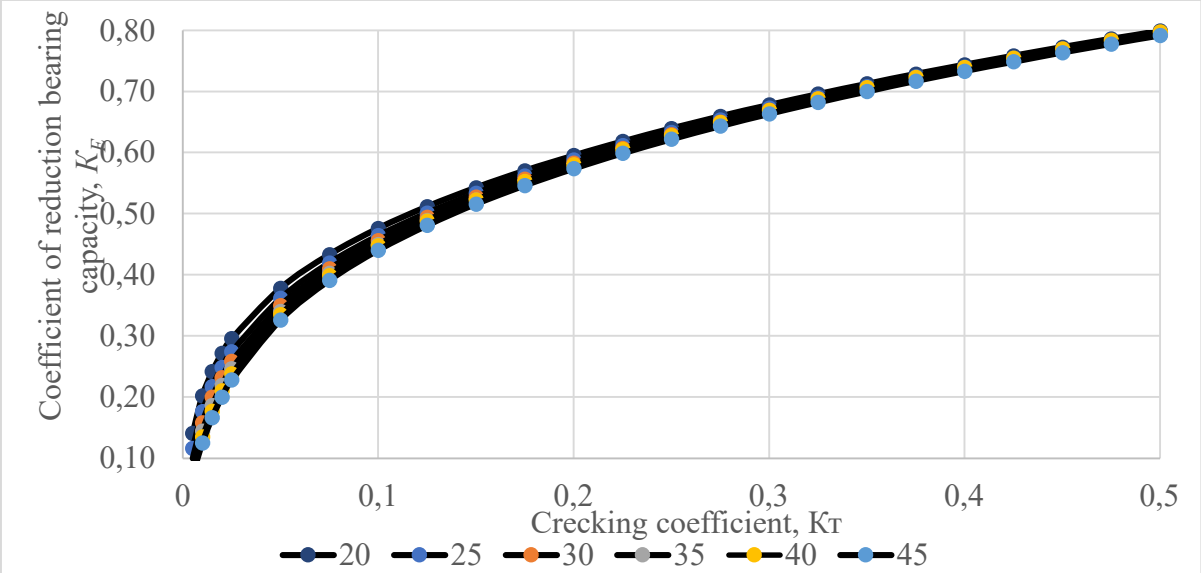


Figure 6 *- Estimation of the change in the coefficient of reduction of the bearing capacity of the pavement from the cracking coefficient of cement concrete for the modulus of elasticity of the base E_2=150 MPa*

Рисунок 6 *- Оцінка зміни коефіцієнта зниження несної здатності дорожнього та аеродромного покриття від коефіцієнта розтріскування цементобетону для модуля пружності основи E_2=150 МПа*

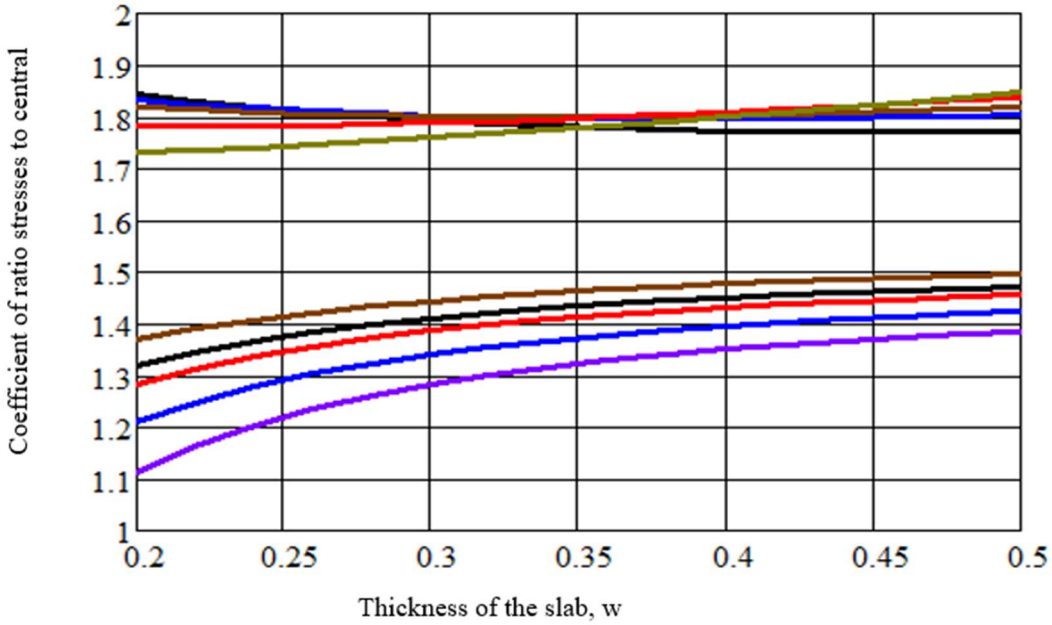


Figure 7 *– Change in the coefficient and $K_{c_i}K_{eg_i}$ depending on the thickness of the slab for the values of the coefficient of seeding 50, 100, 150, 300 and 600 MN·m/m^3*

Рисунок 7 *– Зміна коефіцієнта K_{c_i} та K_{eg_i} залежно від товщини плити для значень коефіцієнта висіву 50, 100, 150, 300 та 600 МН·м/м3*

The analysis of the change in the coefficient and $K_{c_i}K_{eg_i}$ depending on the thickness of the slab for the values of the bed coefficient of 50, 100, 150, 300 and 600 MN·m/m^3 is shown in Fig. 7.

As follows from Fig. 6 and 7 stresses at the corner exceed the stresses in the center of the slab, vary from 1,7 to 1,9 times (on average 1,8 times) and depend little on the coefficient of the bedding. Now it is clear why breakage of the corner of the slab occurs most often, in the absence of reinforcement, which is associated with an excess of stresses by 1,1 -1,6 times compared to the stresses at the edge of the slab, which is fixed in the norms.

Table 1 - *Effect of deformations on strength reduction (approximate reduction coefficients) in a wide range of changes in road pavement structures*

Таблиця 1 *- Вплив деформацій на зниження міцності (приблизні коефіцієнти зниження) в широкому діапазоні змін конструкцій дорожнього одягу*

Type of damage / destruction	Nature of the impact	Reduction factor		Notes
		bearing capacity K_E	durability K_d	
Hair (plastic) cracks ≤0.3 mm	Virtually no effect	0,95–1,0	0,9–0,95	Control; Sealing is not necessary
Shrinkage cracks 0.3–1 mm	Initial defects, accelerated moisture penetration	0,9–0,95	0,8–0,9	Sealing, thin-layer protection, ultra-thin pavements
Operational cracks 1–3 mm	Local Stiffness Reduction	0,85–0,9	0,7–0,8	Repair cracks, keys/staples as needed
Wide cracks >3–5 mm	Loss of solidity of the slab	0,7–0,8	0,5–0,6	Structural repairs/local repairs
Edge chipping, edge fracture	Reduced slab integrity, risk of fracture	0,75–0,85	0,6–0,7	Local replacement, edge reinforcement
Crumbling/falling out of pieces of concrete (spalling)	Violation of contact between the stove and the wheel	0,7–0,8	0,5–0,6	Repair with cards, polymer-repair mixtures
Oscillation/settling of slabs at the seams	Dynamic strokes, opening seams	0,65–0,75	0,5–0,6	Slab jacking, injection
Slab Lifting and Joint Fracture (≥6 mm)	Loss of load transfer	0,6–0,7	0,4–0,5	Restoration of seams, new dowels/staples
Concrete peeling/crumbling (delamination)	Violation of integrity, rapid progression	0,6–0,7	0,3–0,4	Milling, thin layer of wear/reinforcement
Corner breaks	High concentration of stresses at the corner	0,5–0,7	0,3–0,4	Inserts, dowels, local replacement of plates
Block cracks (transverse/longitudinal cracking)	Disability	0,4–0,6	0,2–0,3	Full/partial replacement of the stove
Crack mesh (crocodile skin)	Actual Loss of Bearing Capacity	0,3–0,5	0,2–0,3	Refurbishment/overhaul
Soaking slab breakdown (cracked slabs, stagnant water on the shattered slab pavement)	Actual Loss of Bearing Capacity	≤0,4	≤0,2	Refurbishment/overhaul

The coefficient characterizing the ratio of stress at the edge of the slab to the stress in the center of the slab K_{eg_i} varies from 1,1 to 1,5 and decreases with increasing base coefficient. So, for the 4th category of destruction during reconstruction (coefficient of 600 MN/m^3), you can take values from 1.1 for a slab thickness of 0,20 m to 1,4 for a slab thickness of 0,50 m.

Thus, on a theoretical basis, it is possible to establish a coefficient of reduction in the bearing capacity of the pavement depending on the factors of influence.

These values correspond well to the results of well-known experimental studies by various authors (Table 1 [3]) for durable pavement structures and [1-2] for roads of lower categories. That is, using the given dependencies (1-51), it is possible to take into account the influence of deformations on the reduction of strength in a wide range of changes in road pavement structures and changes in durability, taking into account the increase in stresses in different sections of the slab under different load schemes.

The coefficients of reducing the bearing capacity and durability of cement-concrete pavements depending on the type of damage and destruction are generalized (Table 1). They are formed on the basis of the experience of operation of roads and aerodromes (materials DBN B.2.3-4:2015, ICAO Annex 14, FAA AC 150/5320.

Explanation: φ_n is the multiplier to the calculated bearing capacity. For example, φ_n 0.7 means that the slab is operating at 70% of the design capacity.

φ_d is the coefficient of durability (the ratio of the actual resource to the standard).

The values are indicative, since specific values depend on: the thickness of the slab; base type; load intensity; climatic conditions (freeze-thaw cycles), etc.

For use in practical calculations (for example, when determining the degree of damage or when designing reinforcement layers), it is advisable to use these coefficients as corrective factors to the calculated moduli of elasticity or to the residual resource.

Conclusions

For currently common pavement structures, in the extreme case, for a rough assessment, it can be assumed that when the cracked pavement is loaded near the crack, the deflection is 3 times greater than further from it. At a distance of more than 1.5 ... 2.5 m from the crack, the deflection does not change compared to the original. Then, on average, the deflection increases by 2 times, and the average total modulus of elasticity of the pavement for areas with a destroyed pavement decreases accordingly due to destruction by about 2 times.

Based on the results of the calculations, it is recommended to multiply the calculated values of bending moments m_d, kN·m/m, per unit cross-sectional width of single-layer rigid pavements of all types by k — the transition coefficient from the bending moment at the central loading to the moment at the edge loading of the slab, which is assumed to be equal: for concrete and reinforced concrete pavements with butt joints or structural edge reinforcement — 1.2; for concrete and reinforced concrete pavements, which are arranged without butt joints and edge reinforcement of slabs - 1.4 - 1.5; for slab corners 1.7 -1.8; - for prefabricated pavements made of prestressed reinforced concrete slabs — 1.0; for reinforced concrete pavements with non-stressed reinforcement — according to Fig. 1 of the mandatory Annex 10 of SNiP 2.05.05 Aerodromes [1].

Assessment of the maximum possible change in the total modulus of elasticity of the road pavement due to destruction allows using the obtained coefficients to correct the degradation model according to the data of visual and instrumental inspection of structures. The materials of the work were used in the development of a classifier of defects in road pavements (a system for visual assessment of the condition of the pavement) and the development of a system for managing the condition of the pavement of roads and aerodromes. Based on the A manual for expert assessment of the condition of the pavement has been developed in order to establish the impact of defects and destruction on the change in the bearing capacity of road pavement structures.

The publication was prepared based on the materials received within the framework of the project 2023.04/0097 "Creation of a technology and system for operational analysis and management of cement concrete pavement condition of critical infrastructure facilities based on spectral photos of informational images", funded by the National Research Foundation of Ukraine.

References

1. Gameliak I.P., Kharchenko A.M., Dmytrychenko A.M. Analiz metodiv vyznachennia stupeniu poshkodzhennia tsementobetonnykh pokryttiv avtomobilnykh dorih ta aerodromiv. Naukovyi zhurnal «Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo», 2024. Vypusk 116. Chastyna 1. S.71-80. DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.1-071-080 [in Ukrainian]

2. HBN V.2.3-37641918-557:2016 «Avtomobilni dorohy. Dorozhnii odiah zhorstkyi. Proektuvannia». – Kyiv. – Ministerstvo infrastruktury, 2017. – 75 s. [in Ukrainian]

3. Radovskyi B.C., Suprun A.S., Kozakov I.I. Proektuvannia dorozhnoho odiahu dlia rukhu velykovantazhnykh avtomobiliv. K.: Budivelnyk, 1989. 168 s. [in Ukrainian]

4. Gameliak I.P. Vplyv ruinuvan na zminu mitsnosti konstruktsii dorozhnoho odiahu. // Avtomob. dorohy i dor. bud-vo, Kyiv, NTU, 2001. № 62. S. 157-165. [in Ukrainian]

5 Gameliak, I. P. Kompgiuterni tekhnolohii proektuvannia zhorstkykh dorozhnikh odiahiv / I. P. Gameliak, O. V. Rodchenko // Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy. - 2020. - № 3. - S. 17-23. [in Ukrainian]

6. Westergaard, H.M. Asce E. New formulas for stresses in concrete pavements of airfields, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 113, No. 1, January 1948.

7. Westergaard H.M. New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields. ASCE Transactions, Vol. 113, 1948.

8. HBN V. B.2.3-37641918-559:2019 «Avtomobilni dorohy. Dorozhnii odiah nezhorstkyi. Proektuvannia». – Kyiv. – Ministerstvo infrastruktury, 2019. – 59 s. [in Ukrainian]

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ ТА РУЙНУВАНЬ НА ЗМІНУ НЕСНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ЖОРСТКИХ ПОКРИТТІВ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЙ

Частина 2. Оцінка зміни коефіцієнта зниження несної здатності та деформативності дорожнього та аеродромного покриття

Гамеляк Ігор Павлович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри системного проєктування об'єктів транспортної інфраструктури та геодезії , e-mail: gip65n@gmail.com., +380503524124, https://orcid.org/0000-0001-9246-7561

Харченко Анна Миколаївна, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, e-mail: anna-x3@ukr.net, тел. +380442807909, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 323, https://orcid.org/0000-0001-8166-6389

Дмитриченко Андрій Миколайович, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного права та логістики, e-mail: andrew_d@ukr.net, +380502816006, https://orcid.org/0000-0001-6144-7533

Анотація: Стаття присвячена оцінці впливу механічних пошкоджень покриття цементобетонних жосрткиx дорожніх одягів на їх загальний модуль пружності та довговічність. Зазначається, що руйнування, спричинені транспортними засобами та погодними умовами, знижують модуль пружності дорожнього покриття. Дослідження, описані в статті, показують, що на пошкоджених ділянках доріг середній модуль пружності може бути в 1,9 раза нижчим, ніж на непошкоджених.

Розглянуто різні теоретичні моделі та формули, зокрема гіпотезу Вінклера-Циммермана та метод Вестергаарда, для розрахунку напружень та прогинів плит під навантаженням у центрі, на краю та на куті. Основним типом руйнування жорстких дорожніх покриттів є відколювання кутів плит, яке часто спостерігається в бетоні без армування. Аналіз показує, що наявність наскрізної тріщини може збільшити прогин плити в 1,3-2,7 раза.

Автори дійшли висновку, що логічніше розглядати руйнування через зменшення модуля пружності цементобетону, а не через зменшення товщини шару. У статті також аналізується вплив модуля пружності основи на прогин плити. Оптимальне значення для автомобільних доріг з жорстким

покриттям становить 140-180 МПа. Запропоновано формулу для розрахунку коефіцієнтів приведення до еквівалентної несної здатності за руйнування у вигляді відколів кутів та країв плит.

Ключові слова: жорстке дорожнє покриття, дефекти та руйнування, тріщини, коефіцієнт переходу, плита, прогин, згинальний момент

Перелік посилань

1. Гамеляк І.П., Харченко А.М., Дмитриченко А.М. Аналіз методів визначення ступеню пошкодження цементобетонних покриттів автомобільних доріг та аеродромів. Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», 2024. Випуск 116. Частина 1. С.71-80. DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.1-071-080

2. ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування». – Київ. – Міністерство інфраструктури, 2017. – 75 с.

3. Радовський В.С., Супрун А.С., Козаков І.І. Проектування дорожнього одягу для руху великовантажних автомобілів. К.: Будівельник, 1989. 168 с.

4. Гамеляк І.П. Вплив руйнувань на зміну міцності конструкції дорожнього одягу. // Автомоб. дороги і дор. буд-во, Київ, НТУ, 2001. № 62. С. 157-165.

5. Гамеляк, І. П. Компґютерні технології проектування жорстких дорожніх одягів / І. П. Гамеляк, О. В. Родченко // Промислове будівництво та інженерні споруди. - 2020. - № 3. - С. 17-23.

6. Westergaard, H.M. Asce E. New formulas for stresses in concrete pavements of airfields, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 113, No. 1, January 1948.

7. Westergaard H.M. New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields. ASCE Transactions, Vol. 113, 1948.

8. ГБН В.2.3-37641918-559:2019 Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. – Київ. – Міністерство інфраструктури, 2019. – 59 с.

The publication was prepared based on the materials received as part of the project 2023.04/0097 "Creation of a technology and a system of operational analysis and management of cement-concrete pavement condition of critical infrastructure objects based on spectral photoinformational images", financed by the National Research Fund of Ukraine.

УДК 625.012.25
UDC 625.012.25

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-063-071

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНУ ПРИДАТНІСТЬ ВОДОПРОПУСКНОЇ ТРУБИ

STUDY OF THE IMPACT OF SEEPAGE AND STRUCTURAL DEFORMATIONS ON THE OPERATIONAL SUITABILITY OF A CULVERT PERFORMANCE



Дем'янюк Алла Володимирівна, *старший викладач кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки, Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна, e-mail: a.v.demianiuk@nuwm.edu.ua*

https://orcid.org/0000-0002-5669-8829



Луцько Сергій Іванович, *студент,, Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна, e- mail: sergeilutsko0504@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0003-4887-0972



Павлюк Андрій Павлович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, основ та фундаментів, Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна, e- mail: a.p.pavliuk@nuwm.edu.ua*

https://orcid.org/0000-0003-3958-0519



Супрунюк Володимир Володимирович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, основ та фундаментів, Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна, e-mail: v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua*

https://orcid.org/0000-0001-9534-4460



Фурсович Михайло Олександрович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, основ та фундаментів, Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, e- mail: m.o.fursovych@nuwm.edu.ua*

https://orcid.org/0000-0003-4519-9589

Анотація: Водопропускні труби одні із найпоширеніших штучних споруд на автомобільних дорогах. Практика проектування та обстеження даних споруд говорить про досить часті випадки некоректного їх обслуговування. Більше того, наявні випадки повної відсутності обслуговування водопропускних труб. Дані факти призводять до виникнення певних дефектів і пошкоджень. Серед них

часто можна виділити деформації різного роду (зміщення, прогини, переміщення). У випадках відсутності забезпечення пропуску води через трубу можуть виникати фільтраційні деформації. Поєднання даних видів деформацій із плином часу призводять до різноманітних негативних наслідків.

Величини деформацій конструктивних елементів залізобетонної труби мають великий вплив на її технічний стан та водопропускну спроможність. Перевищення їх нормативних значень, відсутність робіт із систематичного огляду та обслуговування водопропускних споруд призводять в сукупності до незворотніх негативних наслідків, які унеможливлюють забезпечення коректної роботи споруди.

В роботі розглянуті вплив фільтраційних та конструктвиних деформацій на прикладі реальної водопропускної труби. Наведена характеристика труби, вказане місце її розташування. Також наведені дефекти і пошкодження, які виникли, в тому числі через відсутність коректного обслуговування водопропускної споруди. Аналіз стану водопропускної споруди вказує на важливість правильного проектування споруд в частині забезпечення механічного опору та стійкості.

Проведений аналіз технічного стан окремих елементів та споруди в цілому. Враховуючи їх стан, а також характеристики місцевості та витрати води, визначено основні можливі сценарії відмови водопропускної труби. Серед них є руйнування насипу, перелив води, руйнування секцій труби та обвал дороги.

Ключові слова: водопропускна труба, оголовок, технічний стан, насип автомобільної дороги, деформації конструктивних елементів, фільтраційні деформації.

Вступ. Водопропускні труби – одні із найпоширеніших штучних інженерних споруд на автомобільних дорогах, робота яких залежить від якості їх утримання. При експлуатації труб особливу увагу потрібно звертати на стан їх конструктивних елементів, закріплення русел і укосів насипу [1]. До основних заходів з утримання водопропускних труб можна віднести випрямлення вхідних і вихідних русел, їх розчищення, укріплення, заповнення виявлених розмивів. До початку весняного паводку отвори труб варто очищати від снігу, влаштовувати канави для стікання води [2,3]. Крім цього, водопропускні труби повинні знаходитись під систематичним наглядом організацій, які їх утримують. У випадку відсутності робіт з обслуговування водопропускних споруд можуть розвиватись деформації та відбуватись негативні наслідки, які в імовірній сукупності неточностей на етапах проектування та будівництва, в свою чергу, можуть призвести до аварійних ситуацій на автомобільних дорогах. Більше того, некоректна робота водопропускних споруд може привести і до затоплень певних територій, які входять до їх водозбірного басейну.

Метою даної роботи є оцінка впливу фільтраційних деформацій та деформацій конструктивних елементів водопропускної споруди на прикладі водопропускної труби автомобільної дороги О-230209 Великий Олександрів – Малий Олександрів.

Виклад основного матеріалу. Водопропускна труба, на прикладі якої проводилась оцінка впливу фільтраційних та конструктивних деформацій, знаходиться на автомобільній дорозі О-230209 Великий Олександрів – Малий Олександрів на території Віньковецької селищної ради Хмельницької області. Трубчаста водопропускна споруда призначена для пропуску вод водотоку (струмка), що перетинається насипом автодороги. Ділянка автодороги знаходиться в північній частині с. Великий Олександрів Хмельницької обл. В місці розташування труби закладання укосів насипу становило в межах від 1:1,5 (орієнтовно до середини укосу), до 1:1,75 (до відмітки дна). В створі розташування споруди насип має найнижчу відмітку поздовжнього профілю.

Трубчаста водопропускна споруда розташована на ПК 2+45 в нижній частині долини струмка, яку перетинає насип автодороги. Поперечний переріз труби – 2х2 м, довжина споруди – 66,3 м. Конструктивно транзитна частина водопропускної споруди складається із окремих залізобетонних елементів із широкими швами між окремими ланками, із ізоляцією стиків. Про наявність протифільтраційних елементів не вказано. Вхідна і вихідна частина влаштовані у вигляді бетонних оголовків із кріпленням дна монолітним бетоном.

Ситуаційна схема розташування водопропускної труби наведена на рисунку 1.

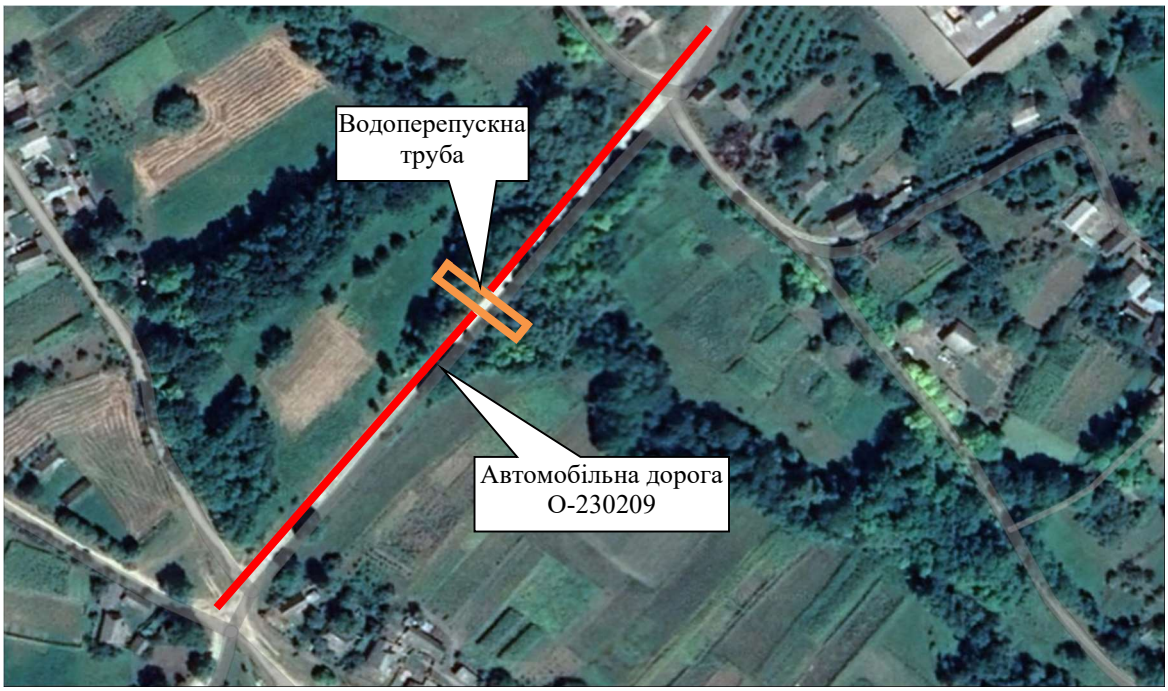


Рисунок 1 *– Місце розташування водопропускної труби*
Figure 1 – Location of the culvert

В процесі дослідження водопропускної труби був проведений аналіз наявної проектної документації. Відповідно до матеріалів проекту, споруда розрахована на пропуск витрати 3% забезпеченості. Відповідно до проекту прийнята розрахункова витрата 7,6 м^3/год. Розрахунковий рівень води перед спорудою – 1,7 м. Проектний режим роботи споруди при пропуску розрахункової витрати – безнапірний. Рік побудови водопропускної труби – 1992.

Гідрогеологічні умови ділянки характеризуються наявністю водоносного горизонту із розвантаженням ґрунтового потоку на схилах долини. До будівництва дороги вихід ґрунтових вод у вигляді джерела розташовувався на схилі яру в 20 м від створу майбутньої дороги. Насип та основа водопропускної труби сформовані з двох інженерно-геологічних елементів – суглинку текучопластичного та глини напівтвердої.

Для перехоплення напірних ґрунтових вод на контакті вапняку та глини з боку берега, з метою уникнення надмірного зволоження тіла насипу автодороги на ПК 1+45 влаштовано трубчастий дренаж (на відм. 30,01 – 29,70 м). Дренаж вкладено перпендикулярно до осі дороги, із скиданням перехоплених фільтраційних вод через відвідні труби по обидва боки насипу, розташовані паралельно до осі дороги, із виходом в кювет по підошві насипу. Відповідно до матеріалів проекту, конструкція дренажу включає перфоровані азбестоцементні труби із гідроізоляцією 2 шарами руберoїду та засипку щебенем дренуючої траншеї, в якій розташований трубчастий дренаж.

В рамках дослідження проводився аналіз стану дорожнього насипу, автомобільної дороги та водопропускної труби.

Дорожній насип в місці влаштування водопропускної труби характеризувався зміною ухилу (від 1:1,15 до 1:1,75). На ділянці зміни ухилів з однієї сторони насипу спостерігалось місцеве (локальне) осідання ґрунту, яке виникло внаслідок руйнування секції водопропускної труби і, відповідно, обвалу ґрунту в середину перерізу труби. Більше того, в місці розташування водопропускної споруди виявлено значні деформації низового укосу насипу в створі водопропускної споруди. В межах всієї довжини

укосу (від гребеня насипу до дна) на його поверхні спостерігаються ознаки розвитку фільтраційних деформацій (винесення часток ґрунту фільтраційним потоком), поверхневої ерозії ґрунту внаслідок дії поверхневого стоку, що утворюється при проходженні дощів. Фільтраційні деформаційні процеси в сукупності із зсувними деформаціями ґрунту призвели, в тому числі, до систематичного зволоження секцій водопропускної труби ззовні. В нижньому б'єфі труби внаслідок розвитку фільтраційних деформаційних процесів та через відсутність оголовків водопропускної споруди утворились значні нерівності ґрунту із частковим «оголенням» крайніх секції труби від ґрунтового покриву. Також через дані процеси крайні секції нижнього б'єфу труби були заповнені ґрунтом на дні, а також спостерігались локальні підмивання основи даних секцій. Укріплення русла на виході водопропускної труби було відсутнє, або знаходилось під значним шаром нанесеного ґрунту (див. рисунок 2).



Рисунок 2 – Стан водопропускної труби в нижньому б'єфі
Figure 2 – Condition of the culvert in the downstream section

Водопропускна труба. На прямокутних залізобетонних секціях труби виявлена значна кількість поперечних тріщин із шириною розкриття до 8 мм (див. рисунок 3). Враховуючи стан секцій та розвиток їх деформацій, можна зробити висновок, що дані тріщини силового характеру.

Внаслідок порушення суцільності покриття і захисного шару арматури залізобетонних секцій розпочались процеси корудування арматурних стержнів. На деяких залізобетонних елементах виявлені сліди корозії. Разом з тим, наявні ділянки із тріщинами в бетоні від збільшення об'єму продуктів корозії арматурних стержнів. Більше того, в нижній частині поперечного перерізу водопропускної труби виявлені місця із руйнуванням захисного шару, сколюванням та корозією робочої арматури (див. рисунок 4).

Приблизно на 1/3 довжини труби від початку вхідного "оголовка" її поперечний переріз повністю завалений ґрунтом внаслідок руйнування декількох залізобетонних секцій. Через виникнення даного завалу вільний пропуск води не здійснюється. Більше того, у зв'язку із руйнуванням секції, існує імовірність потрапляння води під секції труби та виникнення процесів підмивання основи. Даний факт в сукупності із деформуванням секцій призвів до викривлення рівнів внутрішнього поперечного

перерізу водопропускної труби (див. рисунок 5). Це говорить, в тому числі, про пошкодження і руйнування швів між секціями труб і додаткового зволоження й підмивання основи.

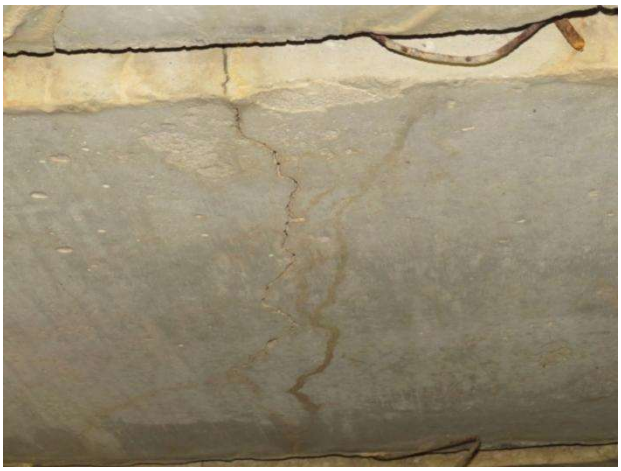


Рисунок 3 – Поперечні тріщини секції водопропускної труби
Figure 3 – Transverse cracks in the culvert section



Рисунок 4 – Руйнування в нижній частині секцій водопропускної труби
Figure 4 – Damage in the lower part of the culvert sections

Основні дефекти водопропускної труби наведені на рис.6.

Руйнування секцій труби та завал її ґрунтом призводить до затримання поверхневих вод, які надходять із верхової частини долини. Води струмка та поверхневого стоку, які утворюються під час дощів та сніготанення, акумулюються перед водопропускною трубою, утворюючи невелику водойму. Накопичені води частково випаровуються з поверхні, частково фільтруються через ґрунт завалу, про що говорить його зволожений стан. Варто відмітити, що частина акумульованої води перед входом у водопропускну трубу також призводить до обводнення ґрунтованого масиву. Даний факт потенційно може призвести до збільшення впливу фільтраційних деформацій на насип, автомобільну дорогу та водопропускну споруду відповідно.

Водопропускна труба, відповідно до класифікаційних характеристик [4, 5, 6], знаходилась в аварійному стані.



Рисунок 5 – Деформації зміщень секцій водопропускної труби
Figure 5 – Displacement deformations of the culvert sections

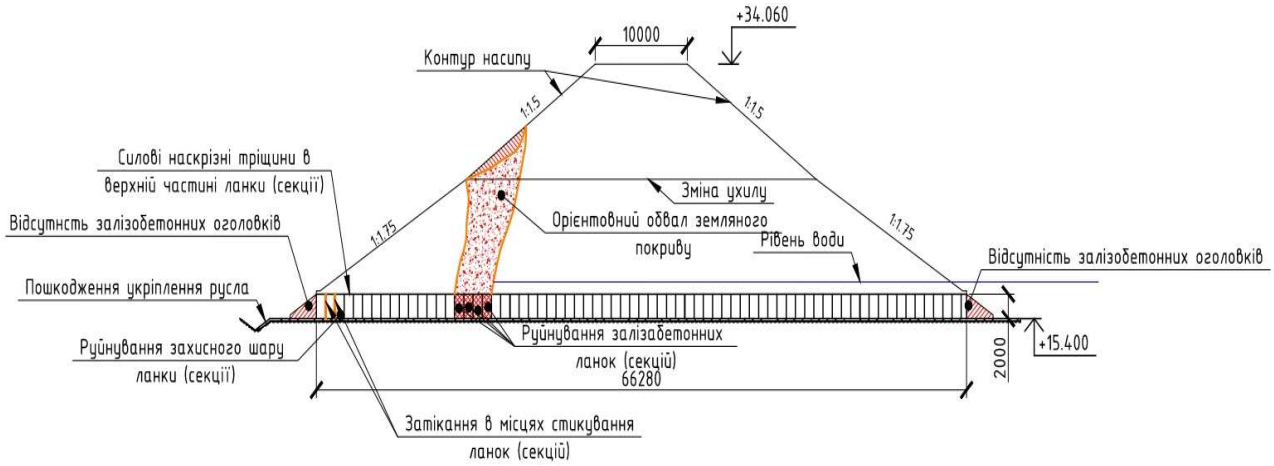


Рисунок 6 – Деформації зміщень секцій водопропускної труби
Figure 6 – Main defects of the culvert

Автомобільна дорога над водопропускною спорудою виконана із двосхилим поперечним профілем. Дорожній одяг - нежорсткого типу. На покритті автомобільної дороги не виявлені ознаки значних деформацій осідання або ямковості, які могли виникнути в результаті руйнування секцій труби безпосередньо під поперечним перерізом дороги. Тому можна зробити висновок, що секції безпосередньо під дорожнім полотном ще виконують утримуючі функції насипу.

Конструкція тіла дорожнього насипу (коефіцієнт закладання укосів насипу, відсутність протифільтраційних пристроїв та дренажу за спорудою) в проектних режимах не передбачає роботу насипу в якості водопідпірної споруди, що тримає напір водойми за нею. Відповідно, стійкість та міцність споруди не може гарантуватися при таких непроектних навантаженнях. Передбачений проектом трубчастий дренаж, за його працездатного стану, мав би перехоплювати ґрунтові води з боку берегу. Проте, за вказаної конструкції дренажу, його ефективність є сумнівною.

Ймовірними матеріальними наслідками руйнування насипу, крім втрати сполучення, яке забезпечувала автодорога, є також виникнення динамічної хвилі прориву, яка може спричинювати руйнування.

З урахуванням конструкції тіла дорожнього насипу було проведено розрахунок параметрів хвилі прориву для найгіршого сценарію – руйнування насипу із переливом води через нього. Орієнтовний об'єм води, який може бути накопичений за насипом із геометричних міркувань 300 тис. м^3. Висота хвилі прориву в створі руйнування, в залежності від розмірів утвореного прорану, може становити від 7 до 10 м. Час спорожнення водойми при цьому становитиме, відповідно, 40 та 25 хв. Контрольним створом, для якого було розраховано час добігання, є місце впадіння долини струмка в долину більш крупного струмка на відстані 700 м. Час добігання хвилі прориву до контрольного створу становить 6 хв. Розрахункова висота хвилі в контрольному створі складає 6,3 та 9 м відповідно.

Висновки. В результаті проведеного обстеження водопропускної труби можна зробити висновки:

- величини деформацій конструктивних елементів залізобетонної труби мають значний вплив на її технічний стан та водопропускну спроможність. Перевищення їх нормативних значень, відсутність робіт із систематичного огляду та обслуговування водопропускних споруд в сукупності призводять до незворотніх негативних наслідків, які унеможливлюють забезпечення роботи споруди відповідно до її функціонального призначення;

- недотримання умов міцності залізобетонних елементів секцій в сукупності із процесами систематичного зволоження насипу, збільшення ваги ґрунту насипу через акумульований об'єм води перед входом в трубу призводить до руйнування несучих конструктивних елементів водопропускної споруди;

- вплив фільтраційних деформацій на технічний стан водопропускної споруди в цілому збільшується із збільшенням дефектів і деформації конструктивних несучих елементів труби;

- за сучасного стану водопропускної споруди можливі такі відмови щодо її роботи:

руйнування насипу при незаповненій водою долині струмка. Продовження надходження ґрунту всередину труби. Відповідно, утворення порожнин в ґрунтовому масиві над трубою. Поступовий розвиток деформацій, що, при появі додаткових несприятливих обставин (посилення обводнення масиву (при сильних зливах, при піднятті рівня води перед спорудою), збільшення навантаження при проходженні важкого транспорту, динамічних навантажень від транспорту тощо призведе до раптового зсуву насипу та, відповідно, пошкодження дорожнього полотна;

руйнування насипу при частково заповненій водою долині струмка. Накопичення вод поверхневого стоку в верховій частині долини (через відсутність пропуску води через трубчастий водопропуск). При збільшенні рівня води за спорудою збільшуються фільтраційні напори та, відповідно, швидкості фільтраційного потоку через тіло насипу, основу та зосереджені ходи фільтрації, які вже наявні навколо конструкцій водопропускної споруди. Результатом накопичення води за насипом буде прогресування існуючих деформацій насипу, що, зрештою, може призвести до руйнування насипу із раптовим вивільненням мас води (проривом тіла насипу).

руйнування насипу із переливом води через нього. Накопичення води за насипом можливе до відмітки верху дорожнього насипу в створі трубчастої споруди. При заповненні цього об'єму, оскільки скид води через трубчастий водопропуск не відбувається, почнеться перелив води через насип. Зважаючи на стан насипу, перелив води через гребінь насипу призведе до його руйнування (та вивільнення мас води).

Перелік посилань

1. Сушков В.Ф. Інструкція по утриманню штучних споруд / В. Ф. Сушков, Л. П. Ватуля, М. М. Літвінов // – К.: Транспорт України, 1999. – 96 с.

2. Лучко Й.Й. Будова та експлуатація штучних споруд / Й.Й. Лучко, О.С. Распонов //-Львів: Каменяр, 2010.-868 с.

3. Бойчук В.С. Довідник дорожника / В.С. Бойчук // - К.: Урожай, 2002.-560 с.

4. ДСТУ Б В.2.3-24:2009 Труби дорожні. Обстеження та оцінювання технічного стану.

5. ДБН В.2.3-6:2009 Споруди транспорту. Мости та труби.Обстеження та випробування.

6. ДСТУ 9123:2021 Настанова з обстеження та випробування мостів і труб.

STUDY OF THE IMPACT OF SEEPAGE AND STRUCTURAL DEFORMATIONS ON A CULVERT PERFORMANCE

Demianyuk Alla V., Senior Lecturer at the Department of hydrotechnical construction and hydraulics, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail *a.v.demianiuk@nuwm.edu.ua*, tel.+380506823661, https://orcid.org/0000-0002-5669-8829.

Lutsko Serhii I., Senior Lecturer at the Department of Transport Construction and Property Management, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: sergeilutsko0504@gmail.com, tel.+380969524405, https://orcid.org/0000-0003-4887-0972.

Pavluk Andrii P., PhD (Candidate of Technical Science), Senior Lecturer at the Department of Automobile Roads, Bases, and Foundations, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: *a.p.pavliuk@nuwm.edu.ua*, tel.+380964496168, https://orcid.org/0000-0003-3958-0519.

Supruniuk Volodumur V., PhD (Candidate of Technical Science), Senior Lecturer at the Department of Automobile Roads, Bases, and Foundations, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: *v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua*, tel.+380977329901, https://orcid.org/0000-0001-9534-4460.

Fursovych Muhailo O. PhD (Candidate of Technical Science), Senior Lecturer at the Department of Automobile Roads, Bases, and Foundations, National University of Water and Environmental Engineering, e-mail: *a.p.pavliuk@nuwm.edu.ua*, tel.+380980254205, https://orcid.org/0000-0003-4519-9589.

Summary. Culverts are among the most common artificial structures on highways. Design and inspection practices indicate frequent cases of improper maintenance. Furthermore, instances of complete lack of culvert maintenance are not uncommon. Such issues lead to specific defects and damages, often including various types of deformations, such as displacements, deflections, and shifts. When water flow through the culvert is not maintained, filtration deformations may also occur. Over time, the combination of these types of deformations leads to a range of negative consequences.

This study examines the impact of filtration and structural deformations using a real-world culvert as a case study. The characteristics of the culvert and its location are detailed, along with the defects and damages that have arisen, including those due to improper maintenance. Analysis of the culvert's condition highlights the importance of proper design to ensure mechanical resistance and stability.

A technical assessment was conducted for specific elements of the structure as well as the structure as a whole. Considering the current condition, local terrain characteristics, and water flow rates, key potential failure scenarios for the culvert have been identified, including embankment collapse, water overflow, culvert section damage, and road collapse.

The extent of deformation in the structural elements of the reinforced concrete culvert significantly affects its technical condition and water throughput capacity. Exceeding standard deformation values and the lack of systematic inspection and maintenance collectively lead to irreversible negative consequences, hindering the culvert's proper operation.

Keywords: technical condition, culvert, road embankment, headwall, deformations of structural elements, filtration deformations.

References

1. Sushkov V.F. Manual for the Maintenance of Artificial Structures / V.F. Sushkov , L. P. Vatulia, M.M. Litvinov//- K.: Transport of Ukraine, 1999.- P.96

2. Luchko Y.Y. Structure and Operation of Artificial Constructions / Y.Y. Luchko, O.S. Rasponov // - Lviv: Kameniar, 2010. – P.868.

3. Boichuk V.S. Road Engineer's Handbook / V.S. Boichuk // - K.: Urozhai, 2002.- P.560.

4.DSTU B V.2.3-6:2009 Culvert: Inspection and Assessment of Technical Condition

5.DBN V.2.3-6:2009 Transport Structures: Bridges and Culverts. Inspection and Testing.

6. DSTU 9123:2021 Guidelines for the Inspection and Testing of Bridges and Culverts.

УДК 625.8:004.5 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-072-086**
UDC 625.8:004.5

СМАРТФОННИЙ МОНІТОРИНГ СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИВУ

SMARTPHONE-BASED MONITORING OF ROAD PAVEMENT CONDITION



Зарічний Антон Олександрович, *аспірант аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: antohazarich@gmail.com, тел. +380442803942*

https://orcid.org/0009-0004-5723-3443



Усиченко Олена Юріївна, *кандидат технічних наук, доцент, в.о.завідувача кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e- mail: fbbk@ukr.net, тел. +380442803942*

https://orcid.org/0000-0002-7482-8420

Анотація. Доведено актуальність створення сучасних підходів до моніторингу стану дорожнього покриву в умовах України, де значна частина автомобільних шляхів перебуває у незадовільному стані, а традиційні методи діагностики відзначаються високою вартістю та обмеженою масштабованістю. У результаті проведеного дослідження досягнуто мети щодо розроблення концепції системи смартфонного моніторингу дорожнього полотна, яка базується на використанні вбудованих сенсорів мобільних пристроїв (акселерометра, гіроскопа, GPS) для збору та аналізу телеметричних даних у режимі реального часу. Для досягнення поставленої мети вирішено низку завдань: здійснено огляд сучасних методів оцінки дорожнього покриву; окреслено технічні аспекти реалізації збору, фільтрації та попередньої обробки сенсорних даних; визначено ключові метрики, що характеризують якість дорожнього покриву, зокрема середньоквадратичне прискорення ($RMSA$), пікові значення та спектральні характеристики сигналу; сформовано архітектуру програмного забезпечення, яке забезпечує сегментацію маршруту, класифікацію ділянок дороги та візуалізацію результатів у форматі інтерактивних карт.

Запропоновано сучасний інструментарій смартфонного моніторингу, який поєднує алгоритми математичної статистики, фільтрації сигналів та методи машинного навчання, що дозволяє виявляти вибоїни, хвилеподібність та інші характерні дефекти дорожнього покриву. У ході експериментальної апробації прототипу мобільного застосунку було підтверджено технічну можливість збору та збереження даних у форматі CSV, їх подальшої обробки у Python із застосуванням бібліотек pandas, numpy, scipy, matplotlib та folium, а також побудови картографічних моделей у вигляді GeoJSON та HTML-мап. Отримані результати свідчать про здатність системи фіксувати відмінності між ділянками дороги різної якості: для рівних відрізків значення $RMSA$ становило 0.3–1.5 м/с², тоді як для пошкоджених сегментів воно сягало понад 4 м/с². Це підтверджує чутливість та інформативність запропонованого підходу.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні методів сенсорного моніторингу з концепціями краудсорсингу, що відкриває можливості для масштабного збору даних про стан доріг без залучення дороговартісного обладнання. Практична цінність розробки визначається економічною доцільністю використання смартфонів як вимірювальних пристроїв, можливістю інтеграції системи у цифрові

платформи для транспорту та міської інфраструктури, а також перспективою створення громадських сервісів для моніторингу якості доріг у режимі реального часу.

У результаті дослідження сформовано науково-методичне підґрунтя для подальшої розробки програмного забезпечення, здатного забезпечувати автоматичне виявлення небезпечних ділянок дороги та формування звітів для дорожніх служб. Подальші напрями дослідження пов'язані з удосконаленням алгоритмів нормалізації даних з урахуванням типу транспортного засобу, швидкісного режиму та положення смартфона, а також з інтеграцією моделей машинного навчання (XGBoost, RandomForest, CNN) для підвищення точності класифікації дефектів дорожнього полотна.

Ключові слова: дефекти дорожнього покриву; експлуатаційний стан автомобільних доріг; моніторинг якості дороги; смартфонні технології; оцінка транспортно-експлуатаційного стану дороги; цифрові карти доріг; мобільні системи діагностики стану доріг.

Вступ. Якість дорожнього покриву є одним із ключових чинників, що визначає безпеку руху транспортних засобів, збереження їхньої технічної справності, комфорт пасажирів та економічну ефективність перевезень. У сучасних умовах України питання забезпечення належного стану автомобільних доріг набуває особливої актуальності, адже у багатьох регіонах спостерігається хронічне недофінансування ремонтних робіт, а значна частина дорожньої мережі перебуває у незадовільному чи навіть аварійному стані. Такі тенденції зумовлюють не лише зростання транспортних витрат, але й підвищення рівня аварійності, що негативно впливає на соціально-економічний розвиток держави.

Поряд із цим, традиційні методи обстеження дорожнього полотна, серед яких лазерне профілювання, вимірювання міжнародного індексу нерівності (IRI) або візуальні інспекції, характеризуються високою вартістю, потребою у використанні спеціалізованого обладнання та залученні кваліфікованого персоналу. Крім того, такі методи реалізуються переважно нерегулярно, що суттєво знижує оперативність прийняття управлінських рішень і не дозволяє своєчасно виявляти проблемні ділянки дорожньої мережі. Це створює ситуацію, за якої дорожні служби часто діють реактивно, реагуючи лише на скарги мешканців або наслідки аварій, замість здійснення системного і превентивного контролю.

Враховуючи викладене, особливого значення набуває пошук нових інструментів моніторингу, здатних забезпечити більшу доступність, масштабованість і оперативність збору даних про стан дорожнього покриву. Останні роки засвідчують зростання уваги до інноваційних підходів, серед яких перспективним напрямом є застосування вбудованих сенсорів сучасних смартфонів – акселерометрів, гіроскопів, GPS-модулів. Такі пристрої здатні фіксувати коливання транспортного засобу та просторові координати, що відкриває можливості для ідентифікації вибоїн, тріщин, хвилеподібності та інших дефектів дорожнього полотна у режимі реального часу.

Використання смартфонів для збору дорожньої інформації має низку суттєвих переваг. По-перше, воно не потребує придбання дороговартісних дорожніх лабораторій та спеціалізованих вимірювальних комплексів. По-друге, така система є масштабованою та здатна охоплювати значні території завдяки залученню звичайних користувачів доріг у межах краудсорсингових платформ. По-третє, цифровізація транспортної галузі та розвиток інформаційно-комунікаційних технологій створюють сприятливі умови для інтеграції подібних рішень у міські транспортні системи та платформи «розумного міста».

Отже, формування сучасної системи смартфонного моніторингу дорожнього покриву є актуальним і своєчасним завданням, яке відповідає глобальним тенденціям цифровізації транспортної інфраструктури та розвитку інтелектуальних транспортних систем. Результати дослідження у цьому напрямі здатні зробити вагомий внесок у підвищення ефективності управління дорожнім господарством, зменшення витрат на експлуатацію транспортних засобів та підвищення рівня безпеки дорожнього руху.

Матеріали та методи. У дослідженні застосовано методи аналізу та узагальнення наукових праць, систематизацію сучасних підходів до моніторингу стану дорожнього полотна, а також елементи

математичного моделювання. Це дозволило обґрунтувати використання сенсорних систем у поєднанні з цифровими технологіями для оцінювання якості доріг.

Метою дослідження є аналіз і порівняння існуючих методів оцінювання стану дорожнього покриву з виокремленням їхніх переваг і обмежень, що формує науково-практичне підґрунтя для створення інноваційних програмних рішень на базі мобільних пристроїв.

Огляд наукових розробок. У світовій практиці виділяють три основні групи методів: традиційні, супутникові та інноваційні сенсорні системи на основі смартфонів [1–5].

Традиційні методи домінують у більшості країн, зокрема й в Україні. Вони базуються на використанні спеціалізованої техніки й вважаються «золотим стандартом» завдяки високій точності вимірювань. Серед них найбільш поширеними є чотири підходи. Лазерне профілювання (Class I) передбачає встановлення лазерних датчиків на транспортний засіб для детального вимірювання профілю дороги; результати дають змогу обчислювати міжнародний індекс нерівності (IRI), що відображає ступінь шорсткості покриву. Інерційні системи (Class II) використовують акселерометри та гіроскопи, встановлені на кузові автомобіля, для визначення параметрів рівності поверхні. Інтегратор вибоїн, або Bump Integrator (Class III), реєструє сумарну амплітуду коливань підвіски транспортного засобу під час руху ділянкою, що робить його дешевшим, але водночас менш точним. Нарешті, візуальні інспекції (Class IV) базуються на експертній оцінці стану дороги за шкалою від 0 до 5, найчастіше використовуються для планування поточного ремонту, проте мають високий рівень суб’єктивності. Попри свою точність, традиційні методи характеризуються низкою суттєвих обмежень: надзвичайно високою вартістю обладнання, необхідністю залучення висококваліфікованого персоналу, складністю обробки результатів та низькою періодичністю проведення обстежень, яка зазвичай обмежується одним разом на рік [2]. Тому вони застосовуються переважно у випадках нормативних досліджень для формування бюджетів, під час аудиту якості нових доріг чи в межах об’єктів капітального будівництва.

Окрему групу складають супутникові методи, які розвиваються завдяки появі відкритих даних та удосконаленню алгоритмів комп’ютерного зору. Вони дозволяють отримувати широке географічне охоплення та здійснювати ретроспективний аналіз за архівними знімками. Наприклад, система Sentinel-2 забезпечує оновлення даних кожні п’ять днів, що створює передумови для регулярного моніторингу. Перевагами такого підходу є відсутність потреби у спеціалізованих виїзних обстеженнях та можливість інтеграції супутніх табличних даних, зокрема про кліматичні чи географічні умови. У дослідженні Cadamuro et al. [3] досягнуто понад 70 % точності при класифікації доріг за п’ятьма класами якості, а у роботі Oshri et al. [4] було реалізовано подібний підхід для оцінки інфраструктури в Африці. Проте супутникові методи мають і значні обмеження: просторове розділення 10–30 м не дозволяє детально ідентифікувати локальні дефекти дорожнього полотна, формування достовірних навчальних вибірок потребує поєднання з даними наземних вимірювань, а реалізація складних моделей вимагає потужних обчислювальних ресурсів та використання спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема Earth Engine API [5]. Унаслідок цього супутниковий підхід частіше використовується як допоміжний інструмент для попереднього визначення пріоритетних ділянок, що потребують детальнішого дослідження.

Найбільш перспективним напрямом сьогодні вважається використання сенсорів сучасних смартфонів, які дозволяють організувати масштабований і дешевий моніторинг дорожнього покриву. Завдяки акселерометрам можна фіксувати вертикальні коливання, що відображають рівність дороги, гіроскоп забезпечує можливість коригування впливу положення пристрою, а GPS-модуль дозволяє точно визначати координати дефектів. Частота вибірки у межах 50–100 Гц забезпечує достатню точність для реєстрації навіть дрібних пошкоджень. У світі вже реалізовано кілька відомих застосунків: Roadroid, який збирає дані акселерометра і формує умовний індекс якості дороги [6]; TotalPave, що поєднує сенсорні вимірювання з візуальними інспекціями; RoadBotics, який використовує відеоаналіз із застосуванням нейронних мереж для автоматичного виявлення тріщин і вибоїн [7].

Застосування смартфонів як засобу моніторингу відкриває нові можливості для створення краудсорсингових платформ. Масове залучення користувачів дає змогу формувати великі масиви

геоприв'язаних даних, які можна використовувати як у наукових цілях, так і для підтримки прийняття управлінських рішень дорожніми службами. Попри це, такі системи мають певні обмеження. Вимірювання залежать від положення смартфона в автомобілі, типу підвіски транспортного засобу та стилю водіння. Дані потребують попередньої фільтрації шумів і відсікання хибних показників. Водночас навіть із цими викликами смартфонний моніторинг залишається одним із найбільш перспективних напрямів розвитку систем контролю стану дорожнього покриву, особливо у країнах з обмеженим фінансуванням дорожньої інфраструктури [6–7].

Виклад основного матеріалу. Формування сучасних інструментів смартфонного моніторингу дорожнього покриву базується на аналізі проблем дорожньої мережі України та розробці програмного забезпечення, здатного забезпечувати оперативне виявлення дефектів у режимі реального часу. Автомобільні дороги в багатьох регіонах перебувають у незадовільному стані, що проявляється у вигляді поздовжніх і поперечних тріщин, осідань, хвилеподібності покриву, локальних вибоїн, розшарувань конструкції дорожнього одягу, деформацій у вигляді колійності, а також пошкоджень узбіч і дренажних систем. Наявність таких дефектів негативно впливає на безпеку руху та підвищує ризик аварійних ситуацій. Водночас існуюча система моніторингу в Україні здебільшого залишається реактивною: дорожні служби зазвичай реагують на скарги мешканців або наслідки аварій, не маючи інструментів для превентивного діагностування.

Запропонована система смартфонного моніторингу дорожнього покриву базується на послідовній обробці сигналів від сенсорів мобільного пристрою. Логіка роботи складається з декількох основних етапів, що забезпечують перехід від збору даних до їх візуалізації на карті.

На першому етапі відбувається збір даних із сенсорів смартфона. Акселерометр реєструє прискорення вздовж трьох осей (X, Y, Z), причому для оцінки якості дорожнього покриву найбільш інформативною є вертикальна вісь (Z). Гіроскоп забезпечує інформацію про кутове положення пристрою та дозволяє відфільтровувати похибки, викликані нахилами чи поворотами смартфона. GPS-модуль визначає геолокацію з похибкою до 2–5 м та фіксує швидкість руху транспортного засобу. За потреби до складу системи можуть бути інтегровані додаткові сенсори, такі як барометр чи магнітометр [10].

Другим етапом є фільтрація сигналу та попередня обробка. Сирі дані акселерометра містять значні шумові складові, що виникають через вібрації автомобіля, характеристики підвіски та положення смартфона. Тому перед подальшим аналізом застосовуються алгоритми згладжування. Серед них особливе місце посідає фільтр Савіцького–Голея, який забезпечує згладжування сигналу без суттєвих втрат амплітуди піків:

$$\widehat{y_i} = \sum_{j=-k}^{k} c_j * x_{i+j} \quad (1)$$

де c_j – коефіцієнти фільтра;

x_{i+j} – значення сигналу.

Іншим поширеним підходом є метод рухомого середнього, що забезпечує просту та надійну обробку:

$$\overline{x_t} = \frac{1}{N} * \sum_{i=t-N+1}^{t} x_i \quad (2)$$

де N – кількість точок у вікні усереднення;

x_i – значення сигналу у момент часу i.

Після фільтрації додатково здійснюється відсікання аномалій, зокрема відрізків з нульовою швидкістю або некоректним положенням пристрою.

На наступному етапі виконується обчислення метричних характеристик сигналу. Основним показником є середньоквадратична амплітуда прискорення ($RMSA$), яка використовується як базова метрика у міжнародній практиці оцінювання стану доріг [8–9]:

$$RMSA = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} a_{z,i}^2} \quad (3)$$

де $a_{z,i}$ – вертикальне прискорення у момент і;
N – кількість відліків сигналу.

Додатково використовуються й інші характеристики: Peak-to-Peak Amplitude (P2P), що визначає різницю між максимальним і мінімальним значенням сигналу, а також спектральний аналіз (FFT), який дозволяє виявляти періодичні коливання, характерні для хвилеподібності чи колійності [11]. Для виявлення імпульсних аномалій (наприклад, вибоїн) застосовуються алгоритми пошуку піків, зокрема find_peaks з бібліотеки scipy.signal [13].



Рисунок 1 – Архітектура та послідовність роботи програмного забезпечення
Figure 1 – Architecture and sequence of software operation

Подальший етап передбачає сегментацію маршруту та класифікацію стану дороги. Траса ділиться на ділянки фіксованої довжини (наприклад, 20 м), для кожної з яких розраховується індекс якості. Залежно від нормалізованих значень $RMSA$ сегменти відносять до категорій: добра дорога (<0,5), задовільна (0,5–1,0), незадовільна (1,0–2,0) або аварійна (>2,0). Для більшої точності можуть застосовуватись алгоритми машинного навчання, зокрема RandomForest, XGBoost або згорткові нейронні мережі [12].

Результати аналізу зберігаються у базі даних або локальних файлах (CSV, GeoJSON), що дає змогу формувати звіти та інтерактивні карти. Для візуалізації застосовуються бібліотеки Folium, Leaflet чи Mapbox, де сегменти дороги відображаються кольоровою шкалою: зелений відповідає доброму стану, помаранчевий — незадовільному, червоний — аварійному. Така карта може бути використана як інженерними підрозділами дорожніх служб, так і громадськими ініціативами [10].

У таблиці 1 наведено технічне наповнення основних блоків системи та приклади інструментів для їхньої реалізації.

Таблиця 1 – Технічні інструменти для реалізації компонентів системи
Table 1 – Technical tools for implementing system components

Блок	**Технічне наповнення**	**Приклади бібліотек**
Збір даних	sensorManager в Android / iOS SDK	Android API, React Native Sensors
Фільтрація	Згладжування сигналу	scipy.signal.savgol_filter, pandas.rolling
Обчислення RMSA	mean(z2)\sqrt{mean(z^2)}	numpy, math
Виявлення піків	Пошук імпульсів у сигналі	scipy.signal.find_peaks, statsmodels
Класифікація	Порогові правила / ML	sklearn, keras, xgboost
Збереження даних	CSV, SQLite, GeoJSON	pandas, sqlite3, geopandas
Візуалізація	Інтерактивні карти	folium, plotly, leaflet.js

Для підтвердження технічної можливості збору даних сенсорів смартфона було розроблено простий прототип Android-додатку. Основним завданням стала демонстрація збору телеметричних даних з акселерометра, гіроскопа та GPS-модуля з подальшим збереженням їх у форматі CSV для аналізу в середовищі Python.

Інтерфейс додатку є мінімалістичним і включає лише дві основні функції: запуск і завершення запису даних (рис. 2). Після активації запису додаток реєструє тривимірні компоненти прискорення, кутові швидкості та координати руху транспортного засобу. Для цього використовується стандартний інструментарій Android – SensorManager для акселерометра і гіроскопа та LocationManager для визначення географічних координат. Усі зібрані дані записуються у CSV-файл построчно з використанням таких полів:

$$Time,\ Type,\ X,\ Y,\ Z,\ Latitude,\ Longitude \tag{4}$$

де $Time$ – часовий штамп у мілісекундах;
$Type$ – тип сенсора (Accelerometer або Gyroscope);
$X,\ Y,\ Z$ – компоненти прискорення чи кутової швидкості по відповідних осях;
$Latitude,\ Longitude$ – координати у градусах.

Таким чином формується база вимірювань, яка надалі може бути оброблена у Python із використанням бібліотек pandas, numpy, scipy та matplotlib. Це забезпечує можливість реалізації алгоритмів фільтрації, обчислення метрик ($RMSA$, P2P, FFT) та побудови картографічних моделей [9–11].

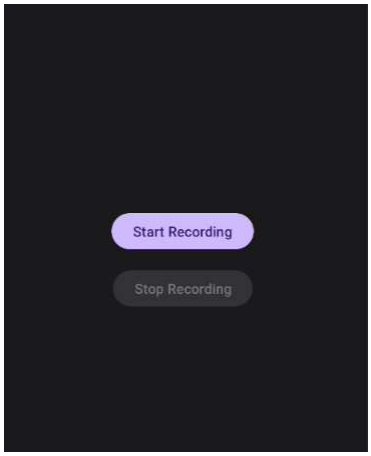


Рисунок 2 – Прототип android-додатку для запису сенсорних даних
Figure 2 – Prototype of the Android application for sensor data recording

Для забезпечення безпеки роботи додатку у файл AndroidManifest.xml додано відповідні дозволи на роботу із сенсорами та геолокацією, а система динамічно запитує підтвердження від користувача. Після компіляції створено інсталяційний APK-файл, що дозволяє розгортати прототип на інших пристроях без використання Android Studio.

Після створення прототипу мобільного застосунку (див. підрозділ 3.6.1) було проведено тестування збору сенсорної інформації під час руху пішки та в автомобілі. Застосунок отримує дані з трьох основних джерел: акселерометра, гіроскопа та GPS-модуля.

Акселерометр вимірює прискорення по осях XXX, YYY, ZZZ та є ключовим сенсором для виявлення нерівностей дорожнього покриву. Гіроскоп фіксує кутові швидкості, що дозволяє враховувати вплив нахилів або поворотів пристрою. GPS-модуль визначає широту, довготу та швидкість переміщення транспортного засобу, забезпечуючи геоприв'язку даних [10–11]. Приклад сирих даних наведено на рисунку 3.

```
Time,Type,X,Y,Z,Latitude,Longitude
1753796015011,Accelerometer,-3.7890346,7.984849,3.2075787,,
1753796015018,Gyroscope,-0.53068876,-2.369697,-0.35475972,,
1753796015022,Accelerometer,-3.5102708,7.668997,4.930411,,
1753796015031,Gyroscope,-0.735023,-2.7823362,-0.3346012,,
1753796015041,Accelerometer,-1.544567,6.6711893,5.389833,,
1753796015051,Gyroscope,-0.95218545,-3.1476336,-0.41706792,,
1753796015061,Accelerometer,0.34456646,8.46102,8.047063,,
1753796015070,Gyroscope,-1.0575596,-1.9646939,-0.9149227,,
1753796015080,Accelerometer,0.046660043,9.930214,10.152746,,
1753796015088,Gyroscope,-1.0056361,-1.5380048,-1.2542582,,
1753796015099,Accelerometer,-0.32542387,7.2849483,6.6628146,,
1753796015108,Gyroscope,-1.1772891,-1.198364,-1.2826633,,
1753796015119,Accelerometer,-0.9882358,5.3336015,6.094519,,
1753796015128,Gyroscope,-1.2292126,-0.6317869,-1.3064871,,
1753796015139,Accelerometer,-1.6917256,4.892126,5.029713,,
1753796015147,Gyroscope,-1.4411827,-0.3990474,-0.961043,,
1753796015158,Accelerometer,-1.9393828,4.3932223,4.2687955,,
1753796015167,Gyroscope,-1.7340924,-0.51327914,-0.4561633,,
1753796015176,Accelerometer,-2.1260228,4.9256253,3.4241292,,
1753796015186,Gyroscope,-1.9460624,-1.3712387,-0.32574365,,
1753796015196,Accelerometer,-1.2059826,6.259624,4.476971,,
```

Рисунок 3 – Приклад сирого csv-файлу з даними сенсорів
Figure 3 – Example of a raw CSV file with sensor data

Первинна обробка та візуалізація даних. Зібрані мобільним застосунком дані акселерометра, гіроскопа та GPS зберігаються у форматі CSV та можуть бути оброблені у Python з використанням бібліотек pandas, numpy, scipy та matplotlib. Первинна обробка включає імпорт даних, переведення часових міток у формат дати й часу з урахуванням часової зони, а також фільтрацію відсутніх або некоректних записів.

Дані акселерометра та гіроскопа структуруються у вигляді окремих колонок для кожної осі. Це дозволяє побудувати часові графіки вертикального прискорення та кутової швидкості, що демонструють характерні коливання транспортного засобу під час руху. Водночас дані GPS використовуються для візуалізації маршруту у вигляді треку на карті, що дозволяє зіставити характеристики вібрацій із конкретними ділянками дороги.

Для додаткового аналізу будуються графіки середньоквадратичного прискорення ($RMSA$), які дозволяють кількісно оцінити рівень нерівності, а також графіки піків прискорення, що ідентифікують локальні удари (наприклад, при проїзді ям). Завершальним етапом є побудова сегментованої карти дорожнього полотна, де кожен відрізок траси отримує власний індекс якості. Візуалізація реалізується у вигляді інтерактивної карти з градацією кольорів від зеленого (добрий стан) до червоного (аварійний) [8–13].

Обчислення метрик дорожнього покриву. Для кількісної оцінки стану дороги застосовуються кілька ключових метрик. Основною є середньоквадратична амплітуда прискорення ($RMSA$), яка добре зарекомендувала себе як універсальний показник рівності покриву та корелює з міжнародним індексом нерівності (IRI) [8–9].

Додатково використовується Peak-to-Peak Amplitude (P2P), що характеризує різницю між найбільшим і найменшим значенням сигналу, а також спектральний аналіз (FFT), який дозволяє виявляти періодичні коливання, пов'язані з хвилеподібністю або колійністю покриву [11]. Для автоматичного виявлення вибоїн застосовується алгоритм пошуку піків (find_peaks з пакету scipy.signal) [13].

Сегментація траси на відрізки довжиною 20–50 м дозволяє прив'язати розраховані метрики до конкретних ділянок дороги. Це створює основу для подальшої класифікації їхнього стану (добрий, задовільний, незадовільний, аварійний) і формування інтерактивних карт для практичного використання дорожніми службами та органами місцевого самоврядування [10,12].

Обчислення метрик дорожнього покриву. Для кількісної оцінки стану дорожнього полотна на основі сенсорних даних зі смартфона застосовується низка метричних характеристик. Вони дозволяють виявляти як локальні дефекти (вибоїни, шви), так і регулярні аномалії (хвилеподібність, колійність).

Найбільш поширеною є метрика середньоквадратичного прискорення ($RMSA$, Root Mean Square Acceleration), яка широко використовується у дорожньо-транспортних дослідженнях [14,15]. Вона визначається як:

$$RMSA = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} a_Z^2(i)} \quad (5)$$

де $a_z(i)$ – миттєве прискорення по вертикальній осі Z;

N – кількість вимірів у вікні.

Зростання значення $RMSA$ свідчить про нерівність покриву, наявність хвиль або локальних пошкоджень.

Іншим показником є **виявлення піків прискорення**. Пікові значення сигналу зазвичай відповідають короткочасним ударам колеса об нерівність (яма, люк, стиковий шов). Для їх визначення застосовуються алгоритми локального пошуку максимумів, наприклад scipy.signal.find_peaks [16].

Додатковим інструментом є **аналіз спектральних характеристик** сигналу. Застосування швидкого перетворення Фур'є (FFT) дозволяє виявляти періодичні дефекти дорожнього полотна

(регулярні хвилі, поперечні стики тощо). Попри необхідність стабільної частоти дискретизації, спектральні методи можуть суттєво підвищити точність класифікації доріг [17].

Після обчислення локальних значень $RMSA$ виконується **сегментація маршруту** на відрізки фіксованої довжини (наприклад, 50 м або 5 с), що дозволяє просторово прив'язати метрики до конкретних координат GPS. Це створює основу для побудови інтерактивних карт якості покриву з кольоровою візуалізацією стану дорожніх сегментів.

Таким чином, поєднання $RMSA$, пікових значень прискорення та спектральних характеристик формує надійний набір показників, придатний для подальшої машинної класифікації та інтеграції у краудсорсингові системи моніторингу доріг [14–17].

```python
def compute_rmsa(df, accel_z_series, window_size=10):
    df['accel_z_filtered'] = savgol_filter(accel_z_series.interpolate(), window_length=11, polyorder=2)
    z = df['accel_z_filtered'].fillna(0)
    z = z - z.mean()

    smoothed = z.rolling(window=window_size, center=True).median()
    rmsa = smoothed.rolling(window=window_size, center=True).apply(lambda x: np.sqrt(np.mean(x**2)))

    return rmsa

def detect_peaks(accel_z_series, threshold):
    return find_peaks(accel_z_series.fillna(0), height=threshold)

def segment_data(df, rmsa, segment_length=30):
    df['segment'] = (np.arange(len(df)) // segment_length).astype(int)
    segments = []
    for segment_id, group in df.groupby('segment'):
        gps_only = group[group['Type'] == 'Location']
        avg_lat = gps_only['Latitude'].mean() if not gps_only.empty else None
        avg_lon = gps_only['Longitude'].mean() if not gps_only.empty else None
        segment_rmsa = rmsa.loc[group.index].dropna()
        avg_rmsa = segment_rmsa.mean() if not segment_rmsa.empty else None

        segments.append({
            "segment": segment_id,
            "avg_latitude": avg_lat,
            "avg_longitude": avg_lon,
            "avg_rmsa": avg_rmsa
        })

    return pd.DataFrame(segments).dropna(subset=["avg_latitude", "avg_longitude"])
```

Рисунок 4 – Схема обчислення основних метрик з даних сенсорів
Figure 4 – Scheme of calculating key metrics from sensor data

Візуалізація результатів аналізу дорожнього покриву. На завершальному етапі обробки дані з сенсорів смартфона та просторові координати візуалізуються у вигляді графіків і карт, що забезпечує зручність інтерпретації та використання результатів.

Основним інструментом є побудова інтерактивної HTML-мапи з градацією стану дорожнього покриву, де кожен сегмент дороги відображається кольором відповідно до середнього значення $RMSA$:

- червоний – аварійний або незадовільний стан (високе $RMSA$),
- жовтий / оранжевий – задовільний стан,
- зелений – добрий стан (низьке $RMSA$).

Візуалізація реалізована з використанням бібліотеки *Folium*, яка забезпечує інтерактивність карти: можливість масштабування, переміщення та збереження результатів у форматі *.html* (рис. 5). Це дозволяє дорожнім службам швидко ідентифікувати критичні ділянки, а також використовувати дані для планування ремонтів.

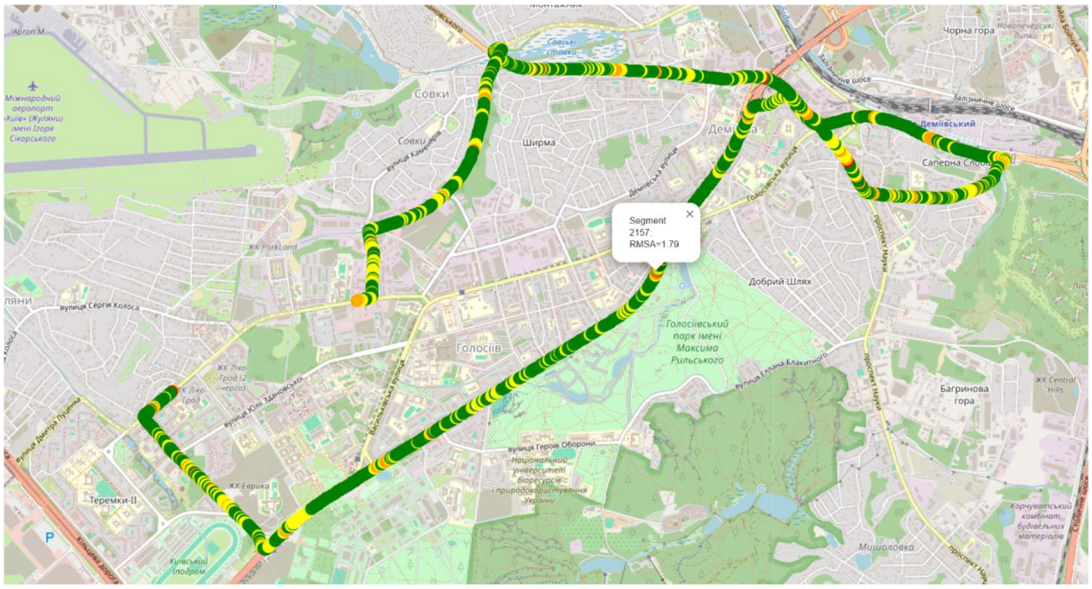


Рисунок 5 – Інтерактивна карта сегментів дороги з індексами $RMSA$
Figure 5 – Interactive road segment map with $RMSA$ indices

Крім інтерактивної карти, у процесі дослідження було побудовано низку додаткових графіків, які ілюструють характеристики сигналів сенсорів. Зокрема, часові графіки прискорень по осях акселерометра (рис. 6) дають змогу простежити динаміку вібрацій під час руху, тоді як графіки кутових швидкостей гіроскопа (рис. 7) відображають зміни орієнтації смартфона та коливання транспортного засобу. Важливим елементом аналізу є виявлені піки прискорення, що відзначаються на графіках як маркери ударів, пов'язаних з проїздом через ями чи нерівності (рис. 8). Додатково формується графік середньоквадратичного прискорення $RMSA$ (рис. 9), який відображає зміну інтегральної характеристики шорсткості дорожнього покриву в часі.

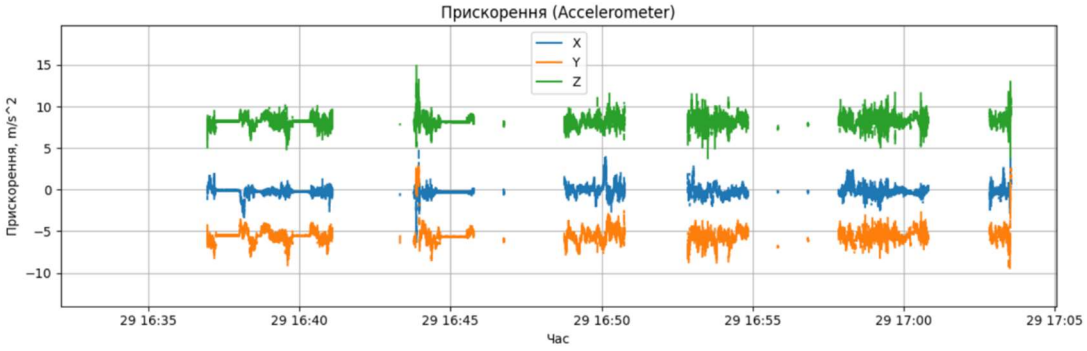


Рисунок 6 – Графік прискорень за даними акселерометра
Figure 6 – Acceleration graph based on accelerometer data

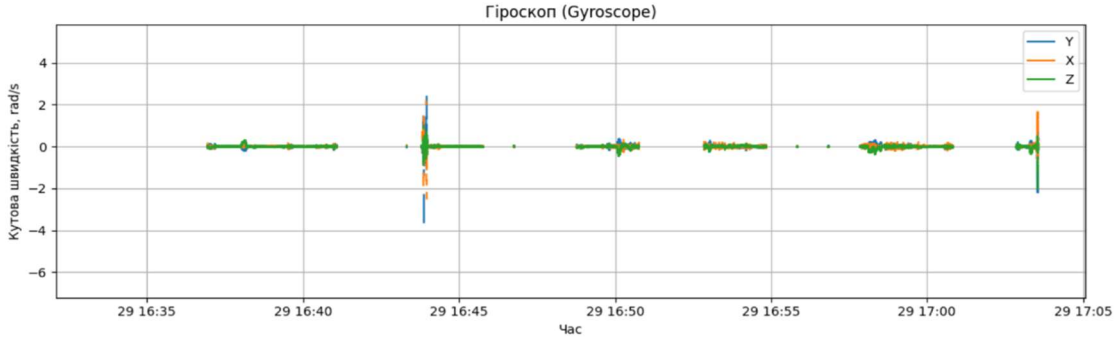


Рисунок 7 – Графік кутових швидкостей за даними гіроскопа
Figure 7 – Angular velocity graph based on gyroscope data

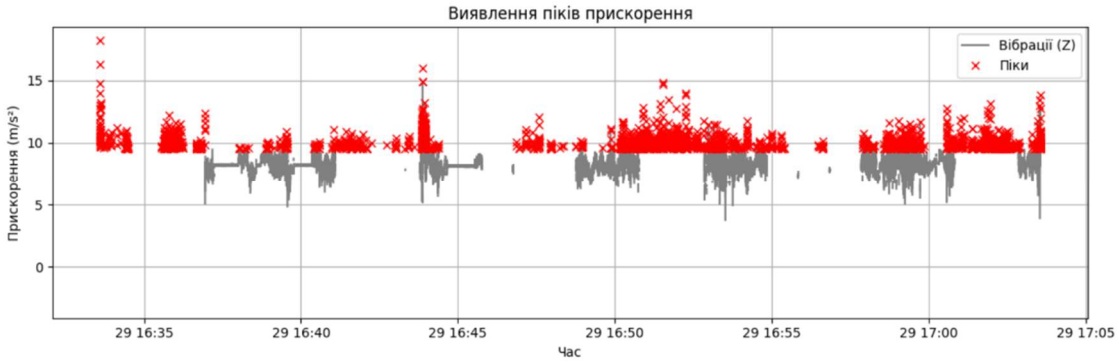


Рисунок 8 – Виявлення піків прискорення (характерні удари)
Figure 8 – Detection of acceleration peaks (characteristic impacts)



Рисунок 9 – Динаміка *RMSA* під час руху
Figure 9 – RMSA dynamics during movement

Окрім візуальних графіків, створюється таблиця сегментів із середніми координатами та значеннями *RMSA* (рис. 10). Вона може експортуватися у форматах *.csv* та *.geojson*, що забезпечує сумісність із сучасними геоінформаційними системами, такими як QGIS чи Mapbox, і дозволяє здійснювати подальший просторовий аналіз.

segment	avg_latitude	avg_longitude	avg_rmsa
1	50.38692857	30.45877463	1.1905873123901394
4	50.38687069	30.45866784	3.1042196801862114
8	50.38680712	30.45857982	0.434899913159301
11	50.38675842	30.45847563	0.299098690431593
15	50.38670193	30.45837965	0.07750715860418164
18	50.38664624	30.45828266	0.41435967208762053
22	50.38658843	30.45818355	0.25355585908477557
25	50.38653159	30.45807609	0.09224395778115105
29	50.386473	30.45797032	0.7931575521074586

Рисунок 10 – Таблиця сегментів із координатами та середніми значеннями $RMSA$
Figure 10 – Table of segments with coordinates and average RMSA values

Застосування візуалізації у цьому контексті має особливе значення. Вона дозволяє оперативно виявляти пріоритетні ділянки дороги, що потребують ремонту, а також створює можливість історичного порівняння стану дорожнього покриву при повторних обстеженнях.

Крім того, результати у вигляді карт та графіків можуть бути використані для підготовки зручних і наочних звітів для муніципальних органів влади та громадських ініціатив. Таким чином, візуалізація відіграє роль містка між числовими даними та реальними дорожніми умовами, роблячи результати придатними для практичного застосування [14–17].

Висновки. У дослідженні застосовано методи аналізу та узагальнення наукових праць, систематизацію сучасних підходів до моніторингу стану дорожнього полотна, а також елементи математичного моделювання. Це дозволило обґрунтувати використання сенсорних систем у поєднанні з цифровими технологіями для оцінювання якості доріг. Метою дослідження було проаналізувати та порівняти існуючі методи контролю дорожнього покриву з виокремленням їхніх переваг і обмежень, що формує науково-практичне підґрунтя для створення інноваційних програмних рішень на базі мобільних пристроїв.

У ході огляду наукових розробок було визначено три основні групи методів: традиційні, супутникові та інноваційні сенсорні системи на основі смартфонів [1–7]. Традиційні методи (лазерне профілювання, інерційні системи, інтегратори вибоїн, візуальні огляди) відзначаються високою точністю, але потребують дороговартісного обладнання, спеціалізованого персоналу та здійснюються з низькою періодичністю. Супутникові підходи відкривають широке географічне охоплення й можливість ретроспективного аналізу, проте обмежені просторовою роздільністю знімків і потребою в потужних обчислювальних ресурсах [3–5]. Найбільш перспективним напрямом визнано смартфонний моніторинг, який забезпечує масштабованість, низьку вартість і можливість створення краудсорсингових систем, що дозволяють залучати велику кількість користувачів до збору геоприв'язаних даних [6–7]. Попри залежність результатів від типу автомобіля, положення телефону й стилю водіння, цей підхід залишається одним із найбільш практичних для країн з обмеженим фінансуванням дорожньої інфраструктури.

Розроблений прототип системи оцінювання стану дорожнього покриву на основі сенсорних даних смартфону дав змогу здійснити первинну апробацію концепції пасивного моніторингу. У процесі випробувань були зібрані дані акселерометра, гіроскопа та GPS у реальних умовах руху легкового автомобіля. Обробка часових рядів дозволила здійснити фільтрацію шумів, виявити піки прискорення та обчислити середньоквадратичне прискорення ($RMSA$), а також пов'язати просторові координати з вібраційним навантаженням. У середньому значення $RMSA$ становили 0,3–1,5 м/с², що свідчить про задовільний стан дорожнього полотна, проте на окремих сегментах показник перевищував 4 м/с², що вказує на наявність локальних дефектів (тріщини, ями, люки, хвилеподібність).

Аналіз інтерактивної карти маршруту (рис. 5) підтвердив адекватність і чутливість методу. Більшість протестованої траси мала добрий стан, що підтверджувалося зеленими сегментами.

Водночас окремі ділянки виділялися жовтими та помаранчевими відмітками, що відповідає нерівностям і тріщинам. Декілька червоних сегментів локалізували зони люків та ям, які супроводжувалися різким зростанням амплітуди прискорень. Таким чином, експериментальні результати підтвердили задовільну точність та практичну придатність використання смартфонних сенсорів для оперативної оцінки дорожнього стану.

З технічного боку, система забезпечила синхронізацію даних різних сенсорів, реалізацію алгоритмічної обробки з урахуванням похибок GPS і зміщення акселерометра, а також візуалізацію результатів на інтерактивних мапах і графіках. Це відкриває перспективи створення мобільного застосунку, здатного у реальному часі інформувати користувачів про небезпечні ділянки та формувати карти дорожніх дефектів у міському масштабі.

Подальший розвиток системи передбачає вдосконалення методів нормалізації сигналів з урахуванням типу транспортного засобу й швидкості руху, розширення набору вібраційних характеристик (спектральний аналіз, коефіцієнти асиметрії, ентропія), а також впровадження алгоритмів машинного навчання для класифікації типів дефектів. Важливим напрямом залишається валідація даних шляхом порівняння з результатами лазерного профілювання чи візуальних обстежень, що дасть змогу підвищити достовірність і встановити нормативні пороги для автоматизованої класифікації стану дорожнього покриву.

Таким чином, апробація підтвердила ефективність і перспективність смартфонних технологій у сфері дорожнього моніторингу, що створює науково-практичне підґрунтя для подальшої розробки повноцінної системи краудсорсингового контролю транспортної інфраструктури.

Перелік посилань

1. Asian Development Bank. (2025). *Guidebook on Machine Learning Techniques for Road Quality Monitoring.* URL: https://www.adb.org/publications/guidebook-machine-learning-road-quality
2. Burningham, S., & Stankevich, N. (2005). *Why Road Maintenance is Important and How to Get It Done.* World Bank Transport Notes, No. 4.
3. Cadamuro, G., Muhebwa, A., & Taneja, J. (2018). Assigning a Grade: Accurate Measurement of Road Quality Using Satellite Imagery. *arXiv preprint*, arXiv:1812.01699.
4. Oshri, B., et al. (2018). Infrastructure Quality Assessment in Africa using Satellite Imagery and Deep Learning. *arXiv preprint*.
5. Gebreegziabher, B. A. (2021). *Mapping Road Pavement Quality from Optical Satellite Imagery using Machine Learning.* University of Twente.
6. Roadroid official website. URL: https://www.roadroid.com
7. RoadBotics official website. URL: https://www.roadbotics.com
8. Sayers, M. W., & Karamihas, S. M. (1998). *The Little Book of Profiling.* University of Michigan Transportation Research Institute.
9. Ghate, A. T., & Qamar, F. (2020). Pavement Condition Monitoring Using Smartphone Sensors: A Review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(2), 237–251.
10. Zhang, L., & Li, Q. (2019). A smartphone-based road roughness detection algorithm using wavelet packet transform. *Sensors*, 19(17), 3822.
11. Chien, S., Ding, Y., & Wei, C. (2002). Dynamic Bus Arrival Time Prediction with Artificial Neural Networks. *Journal of Transportation Engineering*, 128(5), 429–438.
12. SciPy Documentation. *scipy.signal.find_peaks.* URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.find_peaks.html
13. Mednis, A., Strazdins, G., Zviedris, R., Kanonirs, G., & Selavo, L. (2011). Real-time pothole detection using Android smartphones with accelerometers. *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, 1–6.
14. Douangphachanh, V., & Oneyama, H. (2014). A study on the use of smartphones for road roughness condition estimation. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 11, 1718–1732.

15. Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S., & Balakrishnan, H. (2008). The pothole patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring. *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '08)*, 29–39.
16. Wahab, A., & Hussain, K. (2018). Road anomaly detection using smartphone sensors: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 109, 1–11.
17. Folium Documentation. *Python-visualization/folium.* URL: https://python-visualization.github.io/folium

SMARTPHONE-BASED MONITORING OF ROAD PAVEMENT CONDITION

Zarichnyi Anton O., Postgraduate Student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: antohazarich@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5723-3443

Usychenko Olena Yu., PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Acting Head of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: fbbk@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7482-8420

Summary. The article substantiates the relevance of creating innovative approaches to monitoring the condition of road pavement in Ukraine, where a significant part of the road network is in poor condition, while traditional diagnostic methods are characterized by high costs and limited scalability. The aim of the research is to develop a concept of a smartphone-based monitoring system that utilizes built-in sensors (accelerometer, gyroscope, GPS) to collect and analyze telemetry data in real time.

The study reviews modern methods of pavement evaluation, outlines the technical aspects of sensor data collection, filtering, and processing, and identifies key metrics such as Root Mean Square Acceleration ($RMSA$), peak values, and spectral features of the signal. A prototype Android application was developed to record sensor data in CSV format, which was further processed in Python using libraries such as pandas, numpy, scipy, matplotlib, and folium. The results demonstrated the sensitivity of the system to differences in road quality: for smooth segments, $RMSA$ values ranged from 0.3 to 1.5 m/s², while for damaged areas they exceeded 4 m/s². Visualization on interactive maps confirmed the practical applicability of the method for identifying defects such as potholes, cracks, and manholes.

The novelty of the research lies in combining sensor monitoring methods with crowdsourcing concepts, which enables large-scale data collection without the need for expensive equipment. The practical value is defined by the economic feasibility of using smartphones as measuring devices and the possibility of integration into urban transport and smart city platforms. Future research directions include improving data normalization algorithms, considering vehicle type and speed, and applying machine learning models (XGBoost, RandomForest, CNN) for defect classification.

Keywords: road pavement, smartphone, sensors, accelerometer, $RMSA$, monitoring, vibration analysis, machine learning.

References

1. Asian Development Bank. (2025). *Guidebook on Machine Learning Techniques for Road Quality Monitoring*. URL: https://www.adb.org/publications/guidebook-machine-learning-road-quality
2. Burningham, S., & Stankevich, N. (2005). *Why Road Maintenance is Important and How to Get It Done*. World Bank Transport Notes, No. 4.
3. Cadamuro, G., Muhebwa, A., & Taneja, J. (2018). Assigning a Grade: Accurate Measurement of Road Quality Using Satellite Imagery. *arXiv preprint*, arXiv:1812.01699.
4. Oshri, B., et al. (2018). Infrastructure Quality Assessment in Africa using Satellite Imagery and Deep Learning. *arXiv preprint*.

5. Gebreegziabher, B. A. (2021). Mapping Road Pavement Quality from Optical Satellite Imagery using Machine Learning. University of Twente.
6. Roadroid official website. URL: https://www.roadroid.com
7. RoadBotics official website. URL: https://www.roadbotics.com
8. Sayers, M. W., & Karamihas, S. M. (1998). *The Little Book of Profiling*. University of Michigan Transportation Research Institute.
9. Ghate, A. T., & Qamar, F. (2020). Pavement Condition Monitoring Using Smartphone Sensors: A Review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(2), 237–251.
10. Zhang, L., & Li, Q. (2019). A smartphone-based road roughness detection algorithm using wavelet packet transform. *Sensors*, 19(17), 3822.
11. Chien, S., Ding, Y., & Wei, C. (2002). Dynamic Bus Arrival Time Prediction with Artificial Neural Networks. *Journal of Transportation Engineering*, 128(5), 429–438.
12. SciPy Documentation. *scipy.signal.find_peaks*. URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.find_peaks.html
13. Mednis, A., Strazdins, G., Zviedris, R., Kanonirs, G., & Selavo, L. (2011). Real-time pothole detection using Android smartphones with accelerometers. *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, 1–6.
14. Douangphachanh, V., & Oneyama, H. (2014). A study on the use of smartphones for road roughness condition estimation. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 11, 1718–1732.
15. Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S., & Balakrishnan, H. (2008). The pothole patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring. *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '08)*, 29–39.
16. Wahab, A., & Hussain, K. (2018). Road anomaly detection using smartphone sensors: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 109, 1–11.
17. Folium Documentation. Python-visualization/folium. URL: https://python-visualization.github.io/folium

УДК 625.745.2
UDC 625.745.2

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-087-096

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕОРЕТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ, ЯКІ ДІЮТЬ НА ВОДОПРОПУСКНІ ТРУБИ В ЗЕМЛЯНОМУ ПОЛОТНІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

ANALYSIS OF EXISTING THEORETICAL METHODS FOR DETERMINING LOADS ACTING ON WATER PASSAGE PIPES IN THE EARTHEN BED OF AUTOMOBILE ROADS



Каськів Володимир Іванович, *кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Україна, м. Київ, e- mail: vi_kas@ukr.net, тел:+380504458544*

https://orcid.org/0000-0002-8074-6798



Петрович Володимир Васильович, *кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: petrovichvv60@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-0422-2535



Чечуга Олександр Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Україна, м. Київ, e- mail: chechuga77@gmail.com, тел. +380662019442*

https://orcid.org/0000-0003-1643-6354



Авдєєв Максим Олегович*, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: crystalmpg@gmail.com, тел. +380674286515*

https://orcid.org/0009-0007-2961-5526



Чечуга Євген Сергійович*, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: Cecugazena2@gmail.com, тел.+3800937533521*

https://orcid.org/0009-0008-6799-4843

Анотація: У статті розглядаються актуальні проблеми проектування водопропускних труб, зокрема під високими насипами. Основну увагу приділено відсутності достовірних розрахункових

схем для визначення навантажень і напружень, які виникають у таких спорудах. Обґрунтовується необхідність аналізу напружено-деформованого стану системи «насип – водопропускна труба – основа» з метою вдосконалення інженерних методів розрахунку. Наведено основні типи навантажень, що діють на труби, зокрема вертикальний тиск від власної ваги ґрунту.

Ключові слова: будівництво, вага, деформація, навантаження, насип, просідання, пружне тіло, рухоме тимчасове навантаження, тиск, труба, улаштування труби, ущільнення, штучні споруди.

Вступ. Питання проектування водопропускних труб і особливо під високими насипами, не дивлячись на досягнуті в цій області успіхи, до останнього часу вирішені ще не достатньо повно і не задовольняють вимогам практики. Однією із основних причин такого положення слід рахувати відсутність достовірної розрахункової схеми при визначені навантажень, які діють на такі споруди., а також епюри розподілу цього навантаження по зовнішньому периметру труби, внаслідок чого не можна достатньо оцінити напруження, які в ній виникають і гарантувати роботу водопропускних труб без можливого виникнення деформацій. Тому необхідно обстежити найбільш загальну картину напружено-деформованого стану системи “насип – водопропускна труба – основа” з метою розробки та удосконалення інженерних методів розрахунку навантажень, які діють на водопропускну трубу [1].

Виклад основного матеріалу. Загальні відомості про навантаження, які діють на водопропускні труби:

1. Навантаження від власної ваги грунту насипу.

Труби під насипами доріг випробовують навантаження від тиску грунту насипу, від власної ваги конструкції, від тимчасового рухомого навантаження залізничних і автомобільних доріг і доріг промислового транспорту.

Для водопропускних труб, які укладені під насипами автомобільних доріг постійне навантаження у вигляді власної ваги грунту насипу є основним [2]. Величина вертикального тиску від власної ваги грунту на кільця труби більша ніж від ваги стовпа грунту, який розташовується над трубою, так як він залежить не тільки від висоти, але і від сил внутрішнього зчеплення і тертя, які виникають по площині ковзання між стовпом грунту над трубою і ділянками насипу із-за різних умов їх просідання (рис. 1).

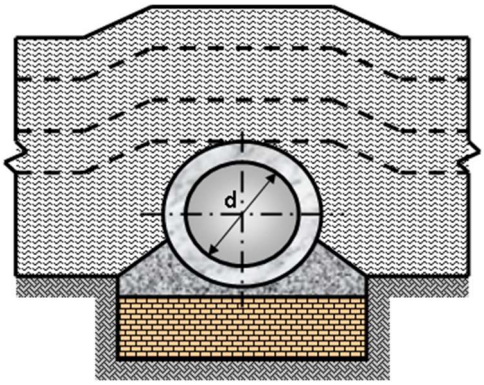


Рисунок 1– Схема роботи труби при просіданні насипу
Figure 1 – Diagram of pipe operation during embankment settlement

Навантаження на трубу від ваги насипу залежить не тільки від висоти стовпа і ваги грунту, але і від взаємодії частинок грунту в процесі їх деформування при ущільненні. По даним експериментальних досліджень роботи жорстких труб встановлено, що в деяких точках вертикальний тиск перевищує тиск від ваги стовпа грунту над трубою на 20-4%, а в деяких випадках в 1,5–2,0 рази.

Розрахунковий вертикальний тиск на трубу визначається за формулою:

$$P = nC_{н}\gamma_{н}H, \quad (1)$$

де n=1,2 – коефіцієнт перевантаження;
$C_{н}$– коефіцієнт сили тертя;
$\gamma_{н}$– нормативна питома вага насипного грунту, кН/м^3;
H– товщина шару від верху дорожнього покриття до верху кільця, м.

Розрахунковий горизонтальний тиск на бокову поверхню кілець визначається за формулою:

$$e_P = \mu_{н}y_{н}\widehat{H}, \quad (2)$$

де $\widehat{H}$ – висота засипки по вісі дороги, рахуючи від підошви рельсів чи верху дорожнього покриття до верха кільця, м.

Для прямокутних труб тиск на стіни труби можна приймати як рівномірно розподілений по висоті, приймаючі його:

$$\hat{\text{H}} = \text{H} + \text{h}/2, \quad (3)$$

де h– висота засипки від поверхні дорожнього покриття до верха кілець труби, м.

Навантаження на трубу, яка укладена під насип залежить від ступеня жорсткості труби і способу її улаштування [3]. Фізично картина цього явища є досить ясною, що ж стосується теоретичного її вираження, то задовільного рішення на сьогодні ще не має. Зупинимося доцільно на фізичних явищах, які проходять в тілі насипу в місці улаштування труби. Роздивимося ці явища паралельно, як для шарнірних труб, так і для жорстких.

1. Шарнірні труби:

Випадок 1. Деформується основа і просідає неущільнений насип.

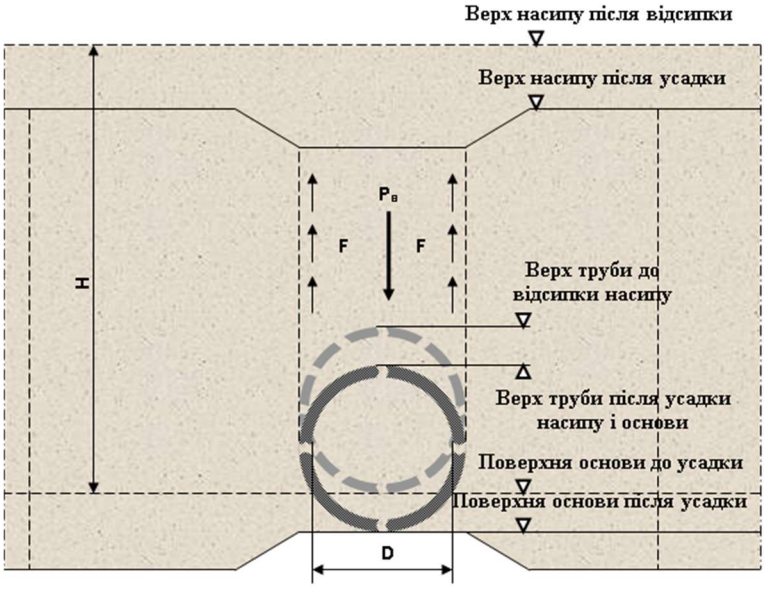


Рисунок 2 – Схема деформації основи, насипу і шарнірної труби
Figure 2 – Diagram of deformation of the base, embankment, and hinged pipe

Розглянемо ділянку насипу в місці розташування труби. Так як вага стовпа грунту над трубою разом з вагою самої труби менше тиску від ваги насипу, то просадка основи під трубою буде менша, чим під насипом, який оточує трубу.

Таким чином, при наявності в основі грунтів, які дають осідання при їх навантажені і при неущільненому насипу будуть мати місце наступні явища:

- тиск на основу шарнірної труби, а разом з цим і просідання основи під трубою, будуть менші, чим під ділянками насипу, які прилягають до труби;
- тиск на трубу від засипки буде меншим ваги стовпа засипки над трубою;
- в результаті деформацій діаметр труби зменшується по вертикалі і збільшується по горизонталі на величину dD.

На рис. 2 приведена схема деформації основи, насипу і шарнірної труби.

Випадок 2. Основа труби не деформується, насип дає просідання.

В цьому випадку відбуваються наступні процеси:

- тиск на трубу від засипки менший ваги стовпа засипки над трубою;
- діаметр труби зменшується по вертикалі і збільшується по горизонталі на *dD;*

На рис. 3 наведена схема деформації насипу і шарнірної труби.

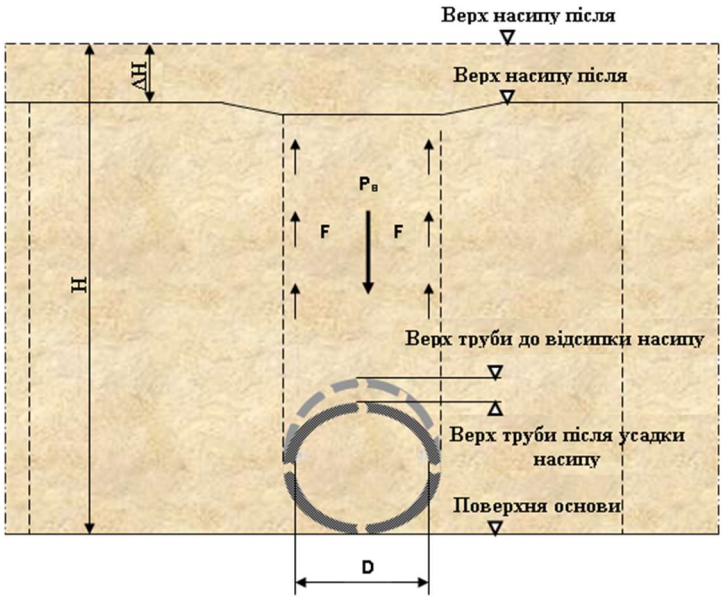


Рисунок 3 – Схема деформації насипу і шарнірної труби
Figure 3 – Diagram of embankment and hinged pipe deformation

Випадок 3. Основа насипу деформується, але насип ущільнений і просідання не дає.

В цьому випадку просідання основи під трубою і під розташованими поруч ділянками насипу будуть схожими і тиск на трубу буде дорівнювати вазі стовпа засипки (рис. 4).

Різниця навантажень на основу під трубою і під ділянками, які прилягають не повинна впливати на рівномірність просідання основи, так як навантажена зверху труба, надаючи горизонтальну дію на грунт і викликаючи появу пасивного тиску, буде ніби-то заклинена в трубі [4].

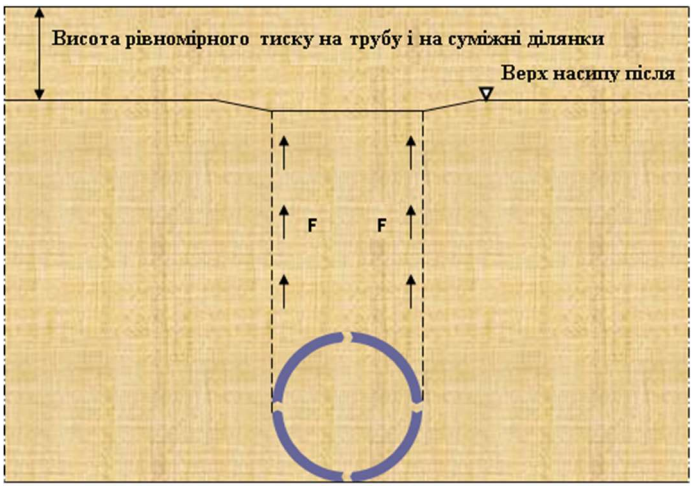


Рисунок 4 – Схема стабілізації насипу і шарнірної труби
Figure 4 – Diagram of embankment stabilization and articulated pipe

Таким чином, в цьому випадку:

- тиск на основу труби, а також просідання під трубою будуть такі ж як і під суміжними ділянками насипу;
- тиск на трубу від засипки буде дорівнювати вазі стовпа засипки.

Випадок 4. Основа не деформується і насип ущільнений.

Тут можна запропонувати таке явище. При відсипці насипу до деякої її висоти буде відбуватися деяка деформація труби. В цей період тиск на трубу буде менший вазі стовпа засипки. Після стабілізації деформацій труби вона, також як і у випадку 3, буде ніби-то занурена в ґрунті, і тиск від відсипаного вище насипу буде передаватися однаково як на трубу, так і на суміжні ділянки насипу. Таким чином сумарне навантаження на трубу буде меншим, ніж вага грунту засипки над трубою.

2. Жорсткі труби:

Випадок 1. Деформується основа і просідає неущільнений насип.

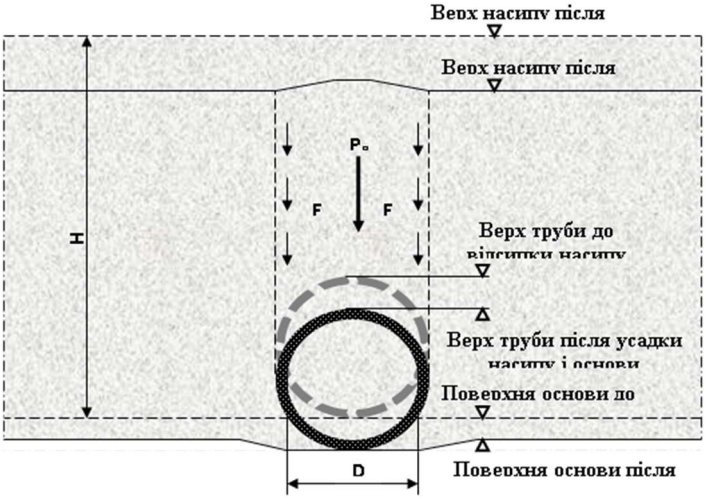


Рисунок 5 – Схема деформації основи і насипу біля жорсткої труби
Figure 5 – Diagram of deformation of the base and embankment near a rigid pipe

Тут картина буде іншою, ніж та, яка має місце при шарнірній трубі. Пружна деформація жорсткої труби настільки мала, що не може визвати зміну сил, які діють навколо труби (рис. 2.5).

Таким чином, можна прийти до наступних висновків:

- тиск в основі жорсткої труби і просідання основи під трубою буде більшим ніж під суміжними ділянками насипу;
- тиск на трубу від засипки буде більше ваги стовпа засипки над трубою;
- деформації жорсткої труби не впливають на розмір тиску на трубу чи на її основу.

Випадок 2. Основа не деформується, насип не ущільнений і дає просідання.

Картина така ж сама, як і у випадку 1.

Випадок 3. Насип ущільнений, а основа дає просідання.

Насип представляє собою по жорсткості однорідний масив (рис. 6). Умови роботи труби характеризуються наступним чином:

- тиск на трубу рівний чи більший ніж вага стовпа засипки над нею;
- тиск і просідання під трубою схожі чи менші, ніж під суміжними ділянками.

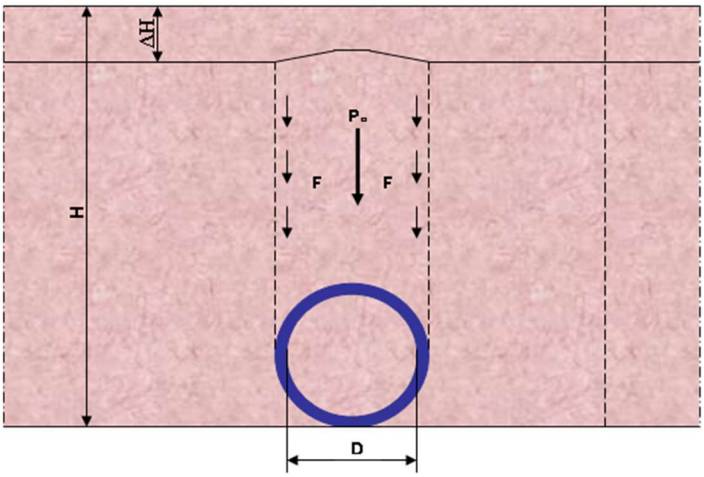


Рисунок 6 – Схема деформації насипу біля жорсткої труби
Figure 6 – Diagram of embankment deformation near a rigid pipe

Випадок 4. Основа не деформується і насип ущільнений.

Послідовність явищ буде такою: після відсипки і ущільнення насипу до рівня верха труби прошарки, які лежать вище, будуть передавати свою вагу так само як на трубу, так і на суміжні призми насипу. Таким чином, навантаження на трубу в цьому випадку буде дорівнювати вазі стовпа засипки над нею (рис.7).

В результаті розглядання чотирьох характерних випадків улаштування шарнірних і жорстких труб під насипом можна зробити висновок, що для труб шарнірної системи тиск на трубу завжди дорівнює або менший ніж вага стовпа засипки, а для жорсткої труби завжди рівний, або більший ніж вага стовпа засипки над трубою.

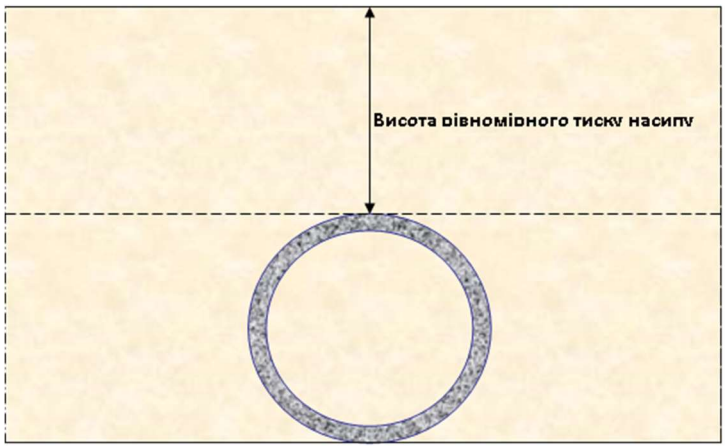


Рисунок 7 – Схема рівномірного тиску насипу на жорстку трубу
Figure 7 – Diagram of uniform pressure of a pile on a rigid pipe

Рухоме тимчасове навантаження

Інтенсивність рухомих тимчасових навантажень з плином часу збільшується. Особливо помітний цей приріст на автомобільних дорогах промислового транспорту. Тимчасове вертикальне навантаження, яке виникає в насипу над трубою спричинює вертикальний і горизонтальний тиски грунту на трубу. Тиск грунту від тимчасових рухомих навантажень на кільця труб визначається в залежності від класу навантаження на дорозі (табл. 1). Для труб під насипами визначальним є колісне навантаження НК-80. Тиск грунту від тимчасових рухомих навантажень (рис. 2.8) приймається з розрахунком розподілу його під кутом arctg0,5 до вертикалі і розраховується по формулі:

$$q_T = \frac{19}{H+3}. \quad (4)$$

Таблиця 1 – Мінімальна висота засипки для навантаження НК-80.
Table 1 – Minimum backfill height for loading NK-80.

навантаження	насип, м
НК-80	H≥1
АБ-51	H≥1,5
АБ-74	H≥2
АБ-151	H≥3

Горизонтальний тиск у всіх випадках дорівнює вертикальному помноженому на μ, причому для прямокутних труб вертикальне навантаження визначається для середини висоти труби. Таким чином, горизонтальний тиск на трубу від тимчасового навантаження визначається за формулою:

$$eq = \mu q_{\text{т}} \quad (5)$$

де qт– вертикальний тиск від нормативного тимчасового навантаження, кН.

$$\mu = \text{tg}^2 - (45^0 - \varphi_n / 2) \quad (6)$$

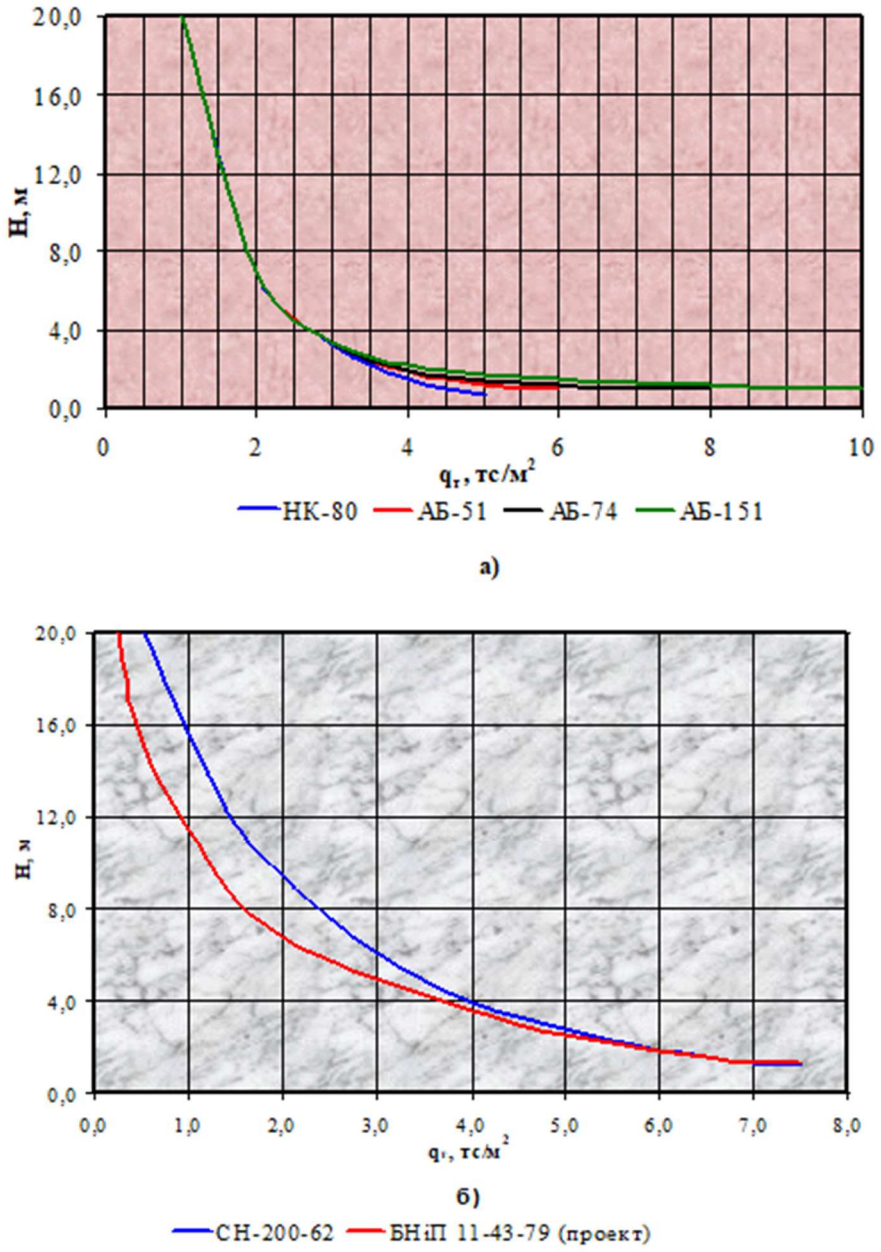


Рисунок 8 – Характер змін вертикального тиску грунту від тимчасового навантаження на кільця труби в залежності від висоти насипу для навантажень:
а) – автомобільних; б) - залізничних.
Figure 8 – Nature of changes in vertical soil pressure from temporary loads on pipe rings depending on embankment height for loads:
a) – road; b) – rail.

Тиск на трубу, яка укладена під насип від рухомого навантаження залежить від розміру цього навантаження, висоти розподільчого шару грунту, розподілу тиску в тілі насипу.

Питання про розподіл тиску в тілі насипу від навантажень, які прикладені на поверхні землі достатньо чітко розгортається в роботі Г. К. Клейна, де приведені рекомендації по визначенню тиску

на труби від рухомого навантаження. Запропоновані автором формули і графік складені на основі теорії про радіальне розподілення напруг в ґрунті від вантажів, які прикладені на поверхні землі.

Для простоти розрахунку був складений графік (рис. 9), який дозволяє визначити тиск на рівні верха труби від різних навантажень, при різних висотах засипки над верхом труби. криві графіка виражають сумарне навантаження від ваги засипки і рухомого навантаження.

Висновки. Аналіз теоретичних досліджень в даній області показав, що існуючі розрахункові схеми, які основані на гіпотезі сипучого тіла, не дивлячись на одержані в багатьох випадках цікаві рішення, не в змозі достатньо повно освітити процеси, які виникають в системі і не виключають можливості невірного визначення діючих на водопропускні труби навантажень.

Більш прогресивним порівняно з вище описаним направленням є система як пружне тіло. Такий підхід безперечно пропонує штучне ущільнення всього насипу чи окремої її частини згідно з розподіленням діючих в ньому напружень, в той час як попередня теорія розглядає насип, який ущільнюється тільки під дією власного тиску і кліматичних факторів. Таким чином видно, що гіпотеза пружного напівпростору в даному випадку не тільки більше задовольняє сьогоднішньому стану справ в дорожньому будівництві, але й дозволяє забезпечити більш визначені і сприятливі умови роботи водопропускних труб.

Перелік посилань

1. ДБН В.2.3-14:2006 Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування

2. Чечуга О.С., Каськів В.І., Лисенко О.П., Лисенко А.М. Деформації, які визначаються умовами статичної роботи труби в конструкції “насип – труба – основа”. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип.82. НТУ, Київ, 2011. С.173 – 180. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/82/173-180.pdf.

3. МР В.2.3-37641918-932:2023 Методичні рекомендації з проєктування водопропускальних труб на автомобільних дорогах загального користування

4. ДСТУ-Н Б В.2.3-34:2016 Настанова з виконання робіт при будівництві мостів та труб.

ANALYSIS OF EXISTING THEORETICAL METHODS FOR DETERMINING LOADS ACTING ON WATER PASSAGE PIPES IN THE EARTHEN BED OF AUTOMOBILE ROADS

Kaskiv Volodymyr I., Candidate of Engineering Science (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: *vi_kas@ukr.net*, tel. +380504458544, *https://orcid.org/0000-0002-8074-6798.*

Petrovych Volodymyr V., Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. OmelyanovichaPavlenka, 1, room 138, https://orcid.org/0000-0003-0422-2535

Chechuha Oleksand S., Candidate of Engineering Science (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: *chechuga77@gmail.com*, tel. +380662019442, *https://orcid.org/0000-0003-1643-6354.*

AvdeevMaksym O., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: *crystalmpg@gmail.com*, tel. *+380674286515, https://orcid.org/0009-0007-2961-5526*

Chechuha Yevhen S., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: *Cecugazena2@gmail.com*, tel.+3800937533521, *https://orcid.org/0009-0008-6799-4843*.

Summary. An analysis of theoretical studies in this area has shown that existing calculation schemes based on the hypothesis of a bulk material, despite the interesting solutions obtained in many cases, are unable to fully illuminate the processes that arise in the system and do not exclude the possibility of incorrect determination of the loads acting on the culverts.

A more progressive approach compared to the one described above is the system as an elastic body. This approach undoubtedly offers artificial compaction of the entire embankment or a separate part of it in accordance with the distribution of stresses acting on it, while the previous theory considers an embankment that is compacted only under the action of its own pressure and climatic factors. Thus, it is clear that the hypothesis of an elastic half-space in this case not only better satisfies the current state of affairs in road construction, but also allows for more definite and favorable operating conditions for culverts.

Keywords: construction, weight, deformation, load, embankment, subsidence, elastic body, mobile temporary load, pressure, culvert, culvert installation, sealing, civil structures.

References

1. DBN V.2.3-14:2006 Transport structures. Bridges and pipes. Design rules

2. Chechuga O.S., Kaskiw V.I., Lysenko O.P., Lysenko A.M. Deformations determined by the conditions of static operation of a pipe in a “fill-pipe-base” structure. Motorways and road construction. Issue 82. NTU, Kyiv, 2011. P. 173–180. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/82/173-180.pdf.

3. MR V.2.3-37641918-932:2023 Methodological recommendations for the design of culverts on public motorways

4. DSTU-N B V.2.3-34:2016 Guidelines for the construction of bridges and culverts.

УДК ДК 625.7/.8 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-097-105**
UDC ДК 625.7/.8

МЕТОДИ ОЦІНКИ ДОРОЖНІХ УМОВ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ

METHODS FOR ASSESSING ROAD CONDITIONS ON HIGHWAYS TO IMPROVE TRAFFIC SAFETY



***Мишковець Сергій Федорович**, аспірант, кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: s.f.myshkovets@gmail.com*

https://orcid.org/0009-0001-1590-8906



***Савенко В'ячеслав Якович,** Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: svi1310@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0001-8174-7728

Анотація: Дорожній рух є ключовим фактором сучасної транспортної системи та економіки країни. Безпека дорожнього руху залишається однією з головних проблем у багатьох державах. Оцінка дорожніх умов є важливим елементом для зменшення аварійності та підвищення ефективності транспортних потоків. Сучасні методи оцінки стану доріг включають як традиційні інспекції, так і цифрові технології. Використання штучного інтелекту дозволяє прогнозувати ризики та визначати аварійно-небезпечні ділянки [9][10]. Мобільні додатки дають змогу громадянам оперативно повідомляти про проблеми на дорогах [4][15]. Інтелектуальні транспортні системи інтегрують дані з різних джерел для оптимізації руху [1].

У статті проаналізовано міжнародні практики оцінки дорожніх умов, зокрема у країнах Європи та Північної Америки [3][14]. Здійснено порівняння із практикою в Україні, де поступово впроваджуються цифрові платформи та системи моніторингу [5][6][11][12]. Розглянуто нормативно-правову базу та методи дорожніх аудитів в Україні [11][12][13]. Виявлено переваги використання прогнозних моделей для оцінки стану покриття та дорожніх об'єктів. Надано огляд інструментів для аналізу ризиків та планування заходів із підвищення безпеки руху. Оцінено ефективність інтеграції міжнародного досвіду у національну практику [14][15].

Встановлено, що застосування цифрових технологій дозволяє скоротити час реагування на аварійні ситуації. Проаналізовано вплив дорожніх умов на інтенсивність руху та частоту ДТП. Вказано на перспективи розвитку методів оцінки стану доріг із використанням великих даних [8][11]. Оцінка дорожніх умов є основою для планування ремонтів та модернізації транспортної інфраструктури. Висвітлено роль співпраці державних органів та приватного сектору у покращенні безпеки руху.

Підкреслено важливість навчання та підвищення кваліфікації дорожніх інспекторів. Стаття демонструє, що системний підхід до оцінки дорожніх умов сприяє значному зниженню ризиків на дорогах та підвищенню загальної безпеки руху.

Ключові слова: оцінка дорожніх умов, безпека руху, міжнародний досвід, Україна, штучний інтелект, мобільні додатки, інноваційні технології, дорожній моніторинг.

Мета роботи: Метою цієї роботи є всебічний аналіз сучасних методів оцінки дорожніх умов з метою підвищення безпеки дорожнього руху. Особлива увага приділяється порівнянню міжнародного досвіду з практикою в Україні для виявлення ефективних підходів та технологій. Дослідження спрямоване на оцінку можливостей впровадження цифрових інструментів та інноваційних методів моніторингу стану доріг. Кінцевою метою є формування рекомендацій щодо вдосконалення системи оцінки дорожніх умов в Україні з урахуванням світових стандартів та практик.

Матеріали та методи. Для досягнення поставленої мети було проведено:

• Огляд міжнародних методів оцінки дорожніх умов, зокрема використання штучного інтелекту та мобільних додатків для моніторингу стану доріг [9][10][15].
• Аналіз нормативно-правової бази України щодо оцінки дорожніх умов та безпеки руху [5][11][12].
• Порівняння практик оцінки дорожніх умов в Україні та за кордоном [3][8][14].

Результати та пояснення

Міжнародний досвід

У країнах Європи, таких як Швеція, Нідерланди та Німеччина, активно застосовуються інноваційні методи оцінки дорожніх умов. Ці країни поєднують традиційні інспекції та дорожні аудити з сучасними цифровими технологіями. Використання штучного інтелекту дозволяє обробляти великі обсяги даних з камер, сенсорів та дронів, що встановлені на дорогах [9][10]. Завдяки цьому можна автоматично виявляти дефекти дорожнього покриття, такі як тріщини, ями та нерівності.

Моделі машинного навчання прогнозують потенційні аварійно-небезпечні ділянки на основі історичних даних про ДТП, погодні умови та інтенсивність руху. Це дозволяє дорожнім службам попереджати водіїв про небезпечні зони та проводити превентивні ремонти. В Швеції інтегрують систему датчиків у дорожнє покриття для постійного контролю стану асфальту та ефективного планування ремонту [3].

У Нідерландах широко використовують інтелектуальні транспортні системи, що включають сенсори для вимірювання щільності трафіку та швидкості руху. Дані обробляються в режимі реального часу, і на основі отриманої інформації автоматично коригуються сигнали світлофорів та обираються оптимальні маршрути для громадського транспорту [3]. Крім того, активно застосовуються мобільні додатки для повідомлення водіїв про стан доріг та аварійні ділянки [4].

Німеччина застосовує автоматизоване сканування дорожнього покриття за допомогою лазерних сканерів та камер високої роздільної здатності. Дані обробляються за допомогою алгоритмів штучного інтелекту для оцінки індексу стану дорожнього покриття (PCI) та визначення зон підвищеного ризику [2].

У США та Канаді використання цифрових технологій поширене на федеральних трасах та магістралях. Дрони та сенсори встановлюються для оперативного моніторингу дорожніх умов. Дані обробляються алгоритмами машинного навчання для прогнозування аварій та оптимізації маршрутів реагування дорожніх служб [8].

Великобританія активно впроваджує інтелектуальні транспортні системи, що враховують погодні умови, трафік та стан покриття. На основі цих даних проводиться оптимізація роботи світлофорів, планування ремонтів та інформування водіїв через цифрові інформаційні панелі [1]. Аналогічні системи впроваджені у Франції, де також використовується прогнозування ризиків ДТП на основі історичних даних та моделей машинного навчання [8].

Норвегія та Данія активно використовують цифрові платформи для збору даних про стан доріг та аварійні випадки. Ці платформи інтегрують інформацію з камер, сенсорів та мобільних додатків, що дозволяє здійснювати комплексний аналіз безпеки. На основі отриманих даних проводяться превентивні ремонти та планування дорожніх робіт, що знижує кількість аварій [3].

У Японії застосовують автономні роботизовані системи для оцінки стану мостів, під'їзних шляхів та великих транспортних розв'язок. Роботи обладнані датчиками та камерами для збору детальних даних про дефекти покриття. Алгоритми штучного інтелекту аналізують ці дані, дозволяючи прогнозувати розвиток дефектів і визначати пріоритетні ділянки для ремонту [10].

В Австралії та Новій Зеландії застосовують подібні системи для віддалених трас, де традиційний контроль складний через географічні особливості. Дрони і автономні мобільні платформи забезпечують регулярне оновлення інформації про стан покриття та швидке реагування на аварійні ситуації [3].

Комбінація цифрових технологій і традиційних аудитів показала найвищу ефективність оцінки дорожніх умов. Інтелектуальні системи дозволяють враховувати погодні умови, час доби, щільність руху та інші фактори ризику, що зменшує ймовірність ДТП. Всі дані інтегруються в єдині платформи, що забезпечує державним органам комплексний аналіз безпеки дорожнього руху та ефективне планування ремонтів.

Міжнародний досвід демонструє, що системний підхід, який поєднує традиційні аудити, цифрові платформи та штучний інтелект, дозволяє значно підвищити ефективність управління дорожньою інфраструктурою. Регулярний моніторинг та прогнозування дефектів покриття сприяють зниженню аварійності та підвищенню безпеки на дорогах.

Українська практика

В Україні традиційні методи оцінки дорожніх умов базуються на дорожніх аудитах, інспекціях та регулярних перевірках, що проводяться відповідно до нормативних актів [5]. Основними завданнями є виявлення дефектів покриття, оцінка стану дорожніх об'єктів та прогнозування можливих аварійних ситуацій. Незалежні аудитори оцінюють як проекти нових доріг, так і стан існуючих шляхів, щоб визначити потенційні небезпеки для учасників руху.

Проте застосування цифрових технологій у цій сфері поки що обмежене. Лише деякі міські служби впровадили пілотні проекти з використанням мобільних додатків та сенсорів [6]. Ці додатки дозволяють водіям оперативно повідомляти про ями, аварії та інші дефекти, але охоплення поки що незначне.

Таблиця 1 – Порівняльні показники оцінки дорожніх умов у різних країнах

Table 1 – Comparative indicators of road conditions assessment in different countries

Країна	**Метод оцінки**	**Використання цифрових технологій**	**Частота моніторингу**	**Середній PCI**	**Основні інструменти**
Швеція	Дорожні аудити + AI	Так	Щомісячно	85	Камери, датчики, ML-моделі
Нідерланди	Інтелектуальні транспортні системи	Так	Постійно	88	IoT, сенсори, додатки
Німеччина	Автоматизоване сканування покриття	Так	Щоквартально	82	Лазерні сканери, ML
США	Мобільні додатки + AI	Так	Щотижня	80	Дрони, датчики, додатки
Великобританія	Дорожні аудити + системи прогнозування	Так	Щомісяця	83	Камери, бази даних, ML
Японія	Автономні системи + AI	Так	Постійно	90	Роботи, датчики, сенсори

Висновок: Таблиця демонструє широкий спектр методів та технологій у країнах Європи та Азії, включаючи активне використання AI, IoT та автономних систем.

Таблиця 2 – Показники оцінки дорожніх умов в Україні
Table 2 – *I*ndicators of assessment of road conditions in Ukraine

Область	**Метод оцінки**	**Використання цифрових технологій**	**Частота моніторингу**	**Середній PCI**	**Основні інструменти**
Київська	Дорожні інспекції + аудити	Частково	Щоквартально	70	Камери, інспекції
Львівська	Аудити + цифрові платформи	Частково	Щоквартально	68	Сенсори, додатки
Дніпропетровська	Дорожні аудити	Обмежено	Щорічно	65	Інспекції, фото
Одеська	Інспекції	Обмежено	Щорічно	63	Інспекції, фото
Харківська	Аудити + пілотні цифрові системи	Частково	Щоквартально	66	Камери, сенсори

Висновок: Показники демонструють, що Україна відстає за частотою моніторингу та масштабом впровадження цифрових технологій у порівнянні з міжнародним досвідом.

Таблиця 3 – Порівняння ризику ДТП за станом дорожніх умов
Table 3 – Comparison of the risk of road accidents according to the state of road conditions

Країна/Область	**Середній PCI**	**Кількість ДТП на 100 км²/рік**	**Основні фактори ризику**	**Використання сучасних методів оцінки**
Швеція	85	5	Погодні умови, швидкість	AI, інтелектуальні системи, дрони
Нідерланди	88	4	Велика інтенсивність руху	IoT, сенсори, мобільні додатки
Німеччина	82	6	Покриття на мостах, дорожні ремонти	Лазерні сканери, ML
США	80	7	Погодні умови, аварійні ділянки	Дрони, датчики, мобільні додатки
Великобританія	83	5	Швидкісні магістралі, дефекти покриття	Камери, бази даних, прогнозні моделі
Японія	90	3	Високий трафік у містах	Роботи, датчики, AI
Київська область	70	12	Дефекти покриття, ями, недостатня розмітка	Частково цифрові платформи, інспекції
Львівська область	68	14	Погодні умови, ями, погана розмітка	Аудити + цифрові платформи
Дніпропетровська	65	16	Вибоїни, незадовільне покриття	Інспекції, фотофіксація
Одеська область	63	18	Вибоїни, дорожня розмітка, пішоходи	Інспекції, фото
Харківська область	66	15	Покриття, швидкість, дефекти мостів	Пілотні цифрові системи, камери

Висновок: Таблиця дозволяє чітко побачити взаємозв’язок між станом покриття, частотою ДТП та застосуванням сучасних методів оцінки.

Таблиця 4 – Порівняльні показники оцінки дорожніх умов: міжнародний досвід та Україна
Table 4 – Comparative indicators of road conditions assessment: international experience and Ukraine

Країна/ Область	**Метод оцінки**	**Використання цифрових технологій**	**Частота моніторингу**	**Середній PCI**	**Кількість ДТП на 100 км²/рік**	**Основні фактори ризику**
Швеція	Дорожні аудити + AI	Так	Щомісячно	85	5	Погодні умови, швидкість
Нідер-ланди	Інтелектуаль-ні транспортні системи	Так	Постійно	88	4	Велика інтенсив-ність руху
Німеччина	Автоматизо-ване сканування покриття	Так	Щоквартально	82	6	Покриття на мостах, дорожні ремонти
США	Мобільні додатки + AI	Так	Щотижня	80	7	Погодні умови, аварійні ділянки
Великобри-танія	Дорожні аудити + прогнозні системи	Так	Щомісяця	83	5	Швидкісні магістралі, дефекти покриття
Японія	Автономні системи + AI	Так	Постійно	90	3	Високий трафік у містах
Київська область	Дорожні інспекції + аудити	Частково	Щоквартально	70	12	Дефекти покриття, ями, недостатня розмітка
Львівська область	Аудити + цифрові платформи	Частково	Щоквартально	68	14	Погодні умови, ями, погана розмітка
Дніпропет-ровська	Дорожні аудити	Обмежено	Щорічно	65	16	Вибоїни, незадовільне покриття
Одеська область	Інспекції	Обмежено	Щорічно	63	18	Вибоїни, дорожня розмітка, пішоходи
Харківська область	Аудити + пілотні цифрові системи	Частково	Щоквартально	66	15	Покриття, швидкість, дефекти мостів

Висновок: Таблиця демонструє:

1. Зв'язок між станом покриття (PCI) та частотою ДТП.
2. Переваги використання цифрових та інтелектуальних технологій у країнах Європи, США та Японії.
3. Відставання України у частоті моніторингу та масштабах впровадження інноваційних методів.
4. Можливі пріоритетні напрямки для вдосконалення систем оцінки дорожніх умов в Україні.

Україна активно співпрацює з міжнародними організаціями, такими як iRAP та Global Road Safety Facility, для адаптації світових практик безпеки руху [5][6]. Проводяться навчальні семінари та тренінги для дорожніх інспекторів з метою підвищення кваліфікації у використанні сучасних методів оцінки стану доріг.

Інтеграція цифрових технологій, включаючи збір даних з камер, сенсорів та дронів, дозволяє покращити прогнозування дефектів покриття та планування ремонтів. У Київській області встановлюють камери на магістралях для моніторингу ям, тріщин і небезпечних ділянок. Львівська область використовує сенсори та цифрові платформи для збору інформації про стан дорожніх покриттів та погодні умови.

Дніпропетровська та Одеська області досі обмежено застосовують цифрові інструменти, переважно проводячи інспекції та фотофіксацію проблемних ділянок. Харківська область запровадила пілотні системи моніторингу з використанням камер і сенсорів, що дозволяє прогнозувати дефекти та планувати ремонти за пріоритетами [7].

Висновки

Інтеграція інноваційних технологій у процес оцінки дорожніх умов значно підвищує ефективність моніторингу та забезпечення безпеки руху [1][4][9]. Використання цифрових платформ, сенсорів, камер та алгоритмів штучного інтелекту дозволяє отримувати точні дані про стан дорожнього покриття у реальному часі. Це скорочує час реагування дорожніх служб на аварійні ситуації та дефекти покриття. Крім того, автоматизація оцінки покриття зменшує людський фактор і підвищує точність прогнозів щодо розвитку дефектів. Завдяки інтеграції цих технологій можна планувати ремонти більш ефективно, що економить бюджетні кошти. Використання таких систем дозволяє одночасно контролювати стан дороги і безпеку учасників руху.

Міжнародний досвід свідчить про доцільність впровадження штучного інтелекту, мобільних додатків та інтелектуальних транспортних систем для покращення оцінки стану доріг [3][10]. Дані про дорожнє покриття та трафік можуть оброблятися автоматично для прогнозування аварійно-небезпечних ділянок. Країни Європи та Японія успішно поєднують AI із традиційними аудитами, що забезпечує комплексну оцінку стану доріг. Мобільні додатки залучають водіїв до оперативного повідомлення про проблеми на маршрутах, підвищуючи швидкість реагування. Інтелектуальні транспортні системи дозволяють оптимізувати рух і підвищити безпеку на великих магістралях. Використання таких інструментів є ефективним навіть у складних погодних та географічних умовах.

Використання цифрових платформ та сенсорів дозволяє оперативно виявляти дефекти покриття і планувати ремонти за пріоритетами [2][6]. Сенсори та дрони збирають дані про тріщини, ями та нерівності, що дозволяє дорожнім службам швидко реагувати на проблемні ділянки. Ця технологія знижує ризик аварій та покращує довговічність дорожнього покриття. Дані аналізуються алгоритмами машинного навчання, що дає змогу прогнозувати розвиток дефектів та планувати ремонти на основі ризиків. В Україні такі системи лише почали впроваджуватися, але міжнародний досвід показує їхню високу ефективність. Впровадження цифрових платформ може стати ключовим кроком для модернізації національної дорожньої інфраструктури.

Україна має потенціал для вдосконалення існуючих методів оцінки дорожніх умов шляхом адаптації передових міжнародних практик з урахуванням національних особливостей [5][7]. Поєднання традиційних аудитів та цифрових технологій дозволить підвищити точність оцінки стану доріг. Впровадження систем моніторингу та прогнозування дефектів допоможе ефективніше

планувати ремонти та скоротити витрати на утримання доріг. Навчання та підвищення кваліфікації дорожніх інспекторів сприятиме більш якісному використанню новітніх технологій. Співпраця з міжнародними організаціями дозволяє адаптувати світові практики безпеки дорожнього руху до українських реалій. Застосування цих підходів забезпечить зниження аварійності та покращить безпеку для водіїв і пішоходів.

Системний підхід, що поєднує традиційні аудити, цифрові технології та прогнозування дефектів, забезпечує зниження аварійності та підвищення безпеки на дорогах. Такий підхід дозволяє комплексно оцінювати стан покриття, транспортні потоки та ризики на дорогах. Інформація з різних джерел об'єднується в єдині цифрові платформи для швидкого прийняття рішень. Прогнозування дефектів покриття дає можливість проводити превентивні ремонти, що значно знижує ймовірність ДТП. Впровадження системного підходу підвищує ефективність дорожніх служб та зменшує людські втрати. Це стратегічно важливий крок для розвитку національної транспортної інфраструктури.

Перелік посилань

1. Aimsun. *Aimsun Live: Real-Time Traffic Forecasting*. 2023. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Aimsun
2. Pavement Condition Index. *Methodology for Assessing Quality of Bitumen Road*. 2023. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Pavement_condition_index
3. Vision Zero. *Multinational Road Traffic Safety Project*. 2023. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Vision_Zero
5. FeGiS. *Early Detection of Dangerous Areas in Road Traffic*. 2023. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/FeGiS
6. Global Road Safety Facility. *Practical Guide for Road Safety Auditors and Inspectors in Ukraine*. 2023. Режим доступу: https://www.globalroadsafetyfacility.org/sites/default/files/2023-10/Practical%20Guide%20for%20Road%20Safety%20Auditors%20and%20Inspectors%20in%20Ukraine.pdf
7. International Road Assessment Programme. *iRAP: Road Safety Audits and Inspections*. 2023. Режим доступу: https://irap.org/
8. Transport. *Risk Analysis of Road Traffic Accidents in Ukraine*. 2024. Режим доступу: https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/view/23190
9. Del Serrone, G. *Proactive Safety Tools to Evaluate Potential Conditions of Road Layouts*. ScienceDirect. 2023. Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146523002405
10. Bhatt, U., Mani, S., Xi, E., Kolter, J. Z. *Intelligent Pothole Detection and Road Condition Assessment*. arXiv. 2017. Режим доступу: https://arxiv.org/abs/1710.02595
11. Karamanlis, I., Kokkalis, A., Profillidis, V., Botzoris, G., Kiourt, C., Sevetlidis, V., Pavlidis, G. *Deep Learning Based Black Spot Identification on Greek Road Networks*. arXiv. 2023. Режим доступу: https://arxiv.org/abs/2306.10734
12. Державне агентство автомобільних доріг України. *Методичні рекомендації з оцінки стану доріг*. Київ, 2022. С. 5–18, 23–45.
13. Міністерство інфраструктури України. *Звіт про стан дорожньої інфраструктури України*. Київ, 2021. С. 12–35, 47–60.
14. Харківська обласна державна адміністрація. *Моніторинг дорожніх умов*. Харків, 2023. С. 7–22, 30–40.
15. Світовий банк. *Безпека дорожнього руху та цифрові технології*. 2022. С. 15–28, 40–55.
16. Програма розвитку ООН в Україні. *Використання мобільних додатків для моніторингу стану доріг*. 2022. С. 3–18, 25–32.

METHODS FOR ASSESSING ROAD CONDITIONS ON HIGHWAYS TO IMPROVE TRAFFIC SAFETY

Myshkovets Serhii F., PhD student at the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: s.f.myshkovets@gmail.com, tel.+380442803942, https://orcid.org/0009-0001-1590-8906

Savenko Vyacheslav Ya, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: svi1310@ukr.net, tel.+380506572008, https://orcid.org/0000-0001-8174-7728

Summary. Road traffic is a key factor in modern transportation systems and a country's economy. Traffic safety remains one of the main challenges in many countries. Assessing road conditions is an essential element for reducing accident rates and improving the efficiency of traffic flows. Modern methods for evaluating road conditions include both traditional inspections and digital technologies. The use of artificial intelligence allows for predicting risks and identifying accident-prone areas [9][10]. Mobile applications enable citizens to promptly report road issues [4]. Intelligent transportation systems integrate data from various sources to optimize traffic [1].

This article analyzes international practices for assessing road conditions, particularly in European and North American countries [3]. A comparison is made with practices in Ukraine, where digital platforms and monitoring systems are gradually being implemented [5][6]. The regulatory framework and methods of road audits in Ukraine are examined. The advantages of using predictive models for assessing pavement and road infrastructure conditions are identified. An overview of tools for risk analysis and planning measures to enhance traffic safety is provided. The effectiveness of integrating international experience into national practice is evaluated.

It has been established that the use of digital technologies reduces response time to emergency situations. The impact of road conditions on traffic intensity and accident frequency is analyzed. Prospects for developing road condition assessment methods using big data are outlined [8]. Assessing road conditions forms the basis for planning repairs and modernizing transportation infrastructure. The role of cooperation between government agencies and the private sector in improving traffic safety is highlighted. The importance of training and upgrading the qualifications of road inspectors is emphasized. The article demonstrates that a systematic approach to assessing road conditions contributes to significantly reducing road risks and enhancing overall traffic safety.

Keywords: road condition assessment, traffic safety, international experience, Ukraine, artificial intelligence, mobile applications, innovative technologies, road monitoring.

References

1. Aimsun. *Aimsun Live: Real-Time Traffic Forecasting*. 2023. Access: https://en.wikipedia.org/wiki/Aimsun

2. Pavement Condition Index. *Methodology for Assessing Quality of Bitumen Road*. 2023. Access: https://en.wikipedia.org/wiki/Pavement_condition_index

3. Vision Zero. *Multinational Road Traffic Safety Project*. 2023. Access: https://en.wikipedia.org/wiki/Vision_Zero

4. FeGiS. *Early Detection of Dangerous Areas in Road Traffic*. 2023. Access: https://en.wikipedia.org/wiki/FeGiS

5. Global Road Safety Facility. *Practical Guide for Road Safety Auditors and Inspectors in Ukraine*. 2023. Access: https://www.globalroadsafetyfacility.org/sites/default/files/2023-10/Practical%20Guide%20for%20Road%20Safety%20Auditors%20and%20Inspectors%20in%20Ukraine.pdf

6. International Road Assessment Programme. *iRAP: Road Safety Audits and Inspections*. 2023. Access: https://irap.org/

7. Transport. *Risk Analysis of Road Traffic Accidents in Ukraine*. 2024. Access: https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/view/23190

8. Del Serrone, G. *Proactive Safety Tools to Evaluate Potential Conditions of Road Layouts*. ScienceDirect. 2023. Access: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146523002405

9. Bhatt, U., Mani, S., Xi, E., Kolter, J. Z. *Intelligent Pothole Detection and Road Condition Assessment*. arXiv. 2017. Access: https://arxiv.org/abs/1710.02595

10. Karamanlis, I., Kokkalis, A., Profillidis, V., Botzoris, G., Kiourt, C., Sevetlidis, V., Pavlidis, G. *Deep Learning Based Black Spot Identification on Greek Road Networks*. arXiv. 2023. Access: https://arxiv.org/abs/2306.10734

11. State Agency of Motor Roads of Ukraine. *Methodical Recommendations for Road Condition Assessment*. Kyiv, 2022. pp. 5–18, 23–45.

12. Ministry of Infrastructure of Ukraine. *Report on the State of Road Infrastructure in Ukraine*. Kyiv, 2021. pp. 12–35, 47–60.

13. Kharkiv Regional State Administration. *Monitoring of Road Conditions*. Kharkiv, 2023. pp. 7–22, 30–40.

14. World Bank. *Road Safety and Digital Technologies*. 2022. pp. 15–28, 40–55.

15. United Nations Development Programme in Ukraine. *Use of Mobile Applications for Road Condition Monitoring*. 2022. pp. 3–18, 25–32.

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-106-112

ПІДВИЩЕННЯ ФАХОВОГО РІВНЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО СУПРОВОДУ ПРОЄКТУВАННЯ ТА БУДІВНИЦТВА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

INCREASING THE PROFESSIONAL LEVEL OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF AUTOMOBILE ROADS



***Мундіров Олександр Миколайович**, провідний інженер відділу технологій Центру досліджень розвитку та утримання об'єктів інфраструктури, Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури», Київ, Україна, e- mail: mundirovvv@gmail,*

https://orcid.org/0009-0004-3360-7498



***Райковський Віталій Францевич,** кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник відділу технологій Центру досліджень розвитку та утримання об'єктів інфраструктури, Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури», Київ, Україна, e- mail: vintikntu@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0002-6391-7647

Анотація. В роботі розглянуто питання щодо підвищення фахового рівня науково-технічного супроводу, насамперед з удосконаленням підходів до проєктування та будівництва автомобільних доріг в сучасних умовах.

Виконано аналіз сучасних методів проєктування, будівництва та впровадження інноваційних технологій. Розглянуто необхідність адаптації галузі вітчизняного будівництва автомобільних доріг до міжнародних стандартів та забезпечення її професійного розвитку. Також розглянуті питання, що пов'язані з екологічними аспеками, застосування цифрових інструментів, та їхній внесок у підвищенні ефективності процесів на етапі проєктування та будівництва автомобільних доріг.

Запропоновано можливі рішення щодо вдосконалення науково-технічного супроводу, який сприятиме підвищенню якості та ефективності виконання робіт у дорожньому будівництва з урахуванням міжнародного досвіду та інтегрування отриманих даних при реалізації науково-технічних рішеннях.

Підвищення фахового рівня науково-технічного супроводу проєктування та будівництва автомобільних доріг шляхом впровадження сучасних технологій, матеріалів і адаптації до вимог міжнародних стандартів значно підвищить професійну компетенцію фахівців дорожньої галузі.

Ключові слова: науково-технічний супровід, автомобільні дороги, проєктування, будівництво, інновації, міжнародні стандарти, BIM-технології, геоінформаційні системи (ГІС), адитивні технології – АМ, екологічний аспект, кадровий потенціал.

Вступ. Розвиток транспортної інфраструктури є одним з основних чинників економічного зростання країни. Автомобільні дороги відіграють важливу роль у забезпеченні пасажирських перевезень, товарообігу, та транспортних зв'язків між регіонами країни. Проте наявна сучасність,

пов’язана з економічними, екологічними та технічними аспектами, потребує удосконалення підходів до проєктування та будівництва автомобільних доріг в сучасних умовах. Зростання обсягів автомобільного транспорту, зношеність існуючих автомобільних доріг і необхідність адаптації до кліматичних змін ставлять перед фаховими науковцями у галузі будівництва додаткові завдання.

Важливість цих факторів потребує не лише оновлення технологій у галузі будівництва, але й підвищення рівня кваліфікації фахівців. Впровадження системного підходу, орієнтованого на довгострокові перспективи, забезпечує інтеграцію інновацій, що мають на меті сталий розвиток транспортної інфраструктури. Це включає екологічні аспекти, цифровізацію процесів, впровадження новітніх технологій і матеріалів та їх адаптацію до міжнародних стандартів.

Матеріали та методи. Методологічною основою виступає науковий підхід до питань підвищення фахового рівня науково-технічного супроводу, шляхом використання аналітичного, формально-логічного методів аналізування.

Метою роботи є розгляд проблеми підвищення фахового рівня науково-технічного супроводу проєктування та будівництва автомобільних доріг шляхом впровадження сучасних технологій, матеріалів, адаптації до вимог міжнародних стандартів та розвитоок професійних компетенцій фахівців.

Виклад основного матеріалу.

Сучасні тенденції в проєктуванні автомобільних доріг.

Основними сучасними тенденціями в проєктуванні автомобільних доріг є технології Building Information Modeling (BIM), геоінформаційні системи (ГІС) та адитивні технології – АМ.

Однією з ключових сучасних тенденцій є цифровізація процесів проєктування. Насамперед використання технології Building Information Modeling (BIM). Це інформаційне моделювання будівельних об’єктів та процес створення і змінення інформації про будівельні об’кти. BIM модель використовується для сумісної роботи та постійно оновлюється на основних єтапах життєвого циклу дорожніх об’єктів під час проєктування. Використання BIM, це забезпечує більш точне планування проєктних рішень, мінімізацію помилок і ефективне управління наявними ресурсами [1].

Концепція BIM дозволяє віртуально створювати об’кти до його фактичного будівництва. Дана технологія унеможливлює невизначеність, вирішує багато питаннь ще на етапі проєктування та моделювання, здійснює аналіз потенційних загроз. Моделювання конструкцію дорожнього одягу з урахуванням геологічних, гідрологічних і кліматичних умов у системі BIM, що значно підвищує якість на кінцевого продукту.

Окрім важливим напрямом модернізації дорожньої галузі є впровадження геоінформаційних систем (ГІС) – сучасної комп'ютерної технології, що дозволяє поєднати модельне зображення території (електронне відображення карт, схем, космо-, аерозображень земної поверхні) з інформацією табличного типу (різноманітні статистичні дані, економічні показники тощо) [2]. ГІС – це комп'ютерна система, що забезпечує можливість використання, збереження, редагування, аналізування та відображення географічних даних. Системи ГІС розрізняють за предметною областю інформаційного моделювання, наприклад: міські, муніципальні та природоохоронні.

Система ГІС дозволяює інтегрувати різні види даних у єдину платформу, що забезпечує швидкий доступ до наступної інформації: топографії місцевості, геологічні умови, існуючу інфраструктуру тощо. Дана технологя також сприяє ефективному управлінню процесом будівництва та належного експлуатаційного утримання автомобільних доріг.

Наразі суттєво швидко розвивається використання технології 3D-друку (адитивні технології-АМ) для створення елементів дорожньої інфраструктури [3].

АМ, це одна із форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу за даними цифрової моделі. Друк здійснюється спеціальним пристроєм - 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання інформації різних шарів на основі віртуальної 3D-моделі.

АМ-технології найбільш динамічно розвиваюча галузь матеріального виробництва, яка дає можливість отримувати нові властивості виробів, економити час та матеріали при їх виготовленні. Ця технологія дозволяє зменшити витрати на виробництво, прискорити процес будівництва та мінімізувати вплив на навколишне довкілля.

Інноваційні технології та матеріали для будівництва автомобільних доріг.

Технології модульного будівництва автомобільних доріг – це інноваційна технологія, яка передбачає використання готових блоків або панелей, які легко транспортуються, швидко встановлюються та замінюються у разі потреби. Ця технологія є сучасним рішенням для забезпечення ефективності, довговічності та екологічності дорожньої інфраструктури. Основними принципами технології є використання цементобетонних і полімерних панелей або армованих панелей для підвищення міцності.

Застосування даної технології передбачається насамперед у випадках будівництва тимчасових доріг (доступ до будівельних майданчиків), тимчасових об'їздів, доріг з високим навантаженням (порти, склади, промислові зони), для пошкоджених ділянок існуючих автомобільних доріг (до завершення повного ремонту), велосипедних доріжок, пішохідних зон та місць для парковок.

Технологія модульного будівництва дозволяє суттєво скоротити час монтажу автомобільної дороги порівняно з традиційними методами. Є можливість багаторазового використання модулів, що знижує довгострокові витрати на будівництво та обслуговування. Зменшується обсяг матеріалів, які потребують транспортування та утилізації. Для виробництва модулів у якості сировини використовують перероблені матеріали. Модулі додатково можуть бути обладнані сенсорами, які відстежують: стан дорожнього покриву, температурні коливання протягом доби / року чи величини навантаження від транспортних засобів. Модульне будівництво автомобільних доріг має широкий потенціал для впровадження у сферах, де ключовими є швидкість виконання робіт, екологічність та адаптивність до змінних умов.

Система Prefabricated Modular Pavement (PMP) (з англ. " Збірно-розбірне модульне покриву ") є інноваційним підходом при ремонті та будівництві автомобільних доріг. Ця технологія використовується для скорочення часу на виконання ремонтних робіт, підвищує якості робіт та мінімізацує негативний впливу від транспортного потоку на його елементи. PMP - складається з попередньо виготовлених модулів дорожнього покриву, які можуть бути швидко доставлені на місце виконання робіт та встановлені з мінімальними затратами часу. Основними матеріалами для виготовлення модулів є цементобетон (найчастіше застосовується попередньо напружений цементобетон який забезпечує міцності та довговічності), асфальтобетонні панелі (можуть використовуватись у менш навантажених зонах), композиційні матеріали (суміші полімерів – забезпечують гнучкость конструкцій). Використання модульних конструкцій PMP доцільно насамперед для швидкого ремонту автомобільних доріг, де кожна година простою значно впливає на економіку, безпеку транспортного потоку, на мостах та естакадах для швидкого відновлення дорожнього полотна (на обмежених ділянках) та у аеропортах на злітно-посадкових смугах, де затримки у русі не допустимі [4].

Впровадження електрифікованих доріг, які здатні заряджати електромобілі під час руху, є ще одним перспективним напрямом досліджень та впроваджень. Такі проєкти вже реалізуються у деяких країнах, демонструют значний потенціал для зменшення залежності від традиційних джерел енергії та сприяють розвитку електромобільності.

Розумні дороги – це інноваційна технологія, що включає в себе використання сучасних інформаційних та комунікаційних технологій для поліпшення функціональності, безпеки та ефективності дорожньої інфраструктури [5]. Розумні дороги інтегрують інтелектуальні системи, датчики, мережі зв'язку та автоматизацію, що створює умови для безпеки учасників дорожнього руху, та забезпечує та стійким до змін кліматичних умов. Розумні дороги часто використовують інтеграцію з транспортними системами ITS (Intelligent Transport Systems) для збору і аналізу даних про потік транспорту, затори, погодні умови, що дозволяє в реальному часі керувати дорожнім рухом та реагувати на зміни ситуації (динамічні дорожні знаки, які змінюються в залежності від умов та

інтерфейси для водіїв, що надають їм інформацію про стан доріг, транспортні засоби, що наближаються, або аварійні ситуації).

Важливо також зазначити роль автоматизованих систем контролю якості будівництва доріг, які використовують штучний інтелект і машинне навчання. Ці технології дозволяють зменшити ймовірність людських помилок, підвищуючи точність та швидкість аналізу даних та прийняття зважених рішень.

Окрему увагу варто приділити матеріалам з функціональними властивостями (як приклад – дренуючий асфальтобетон). Такі матеріали активно досліджуються у країнах світу, демонструючи значні переваги в умовах міського середовища.

Використання технології улаштування шару покриву з пористого асфальтобетону [6]. Це сучасний дорожній покрив, які володіє високою водопроникністю завдяки своїй структурі. Пори створюються шляхом зменшення кількості дрібних часток у складі асфальтобетонної суміші. Вода швидко проходить через шар покриву в нижні конструктивні (дренажні) шари або відводиться від проїщзної частини через спецальні інженерні системи водовідведення. Основна мета таких покривів – швидке відведення води з поверхні автомобільної дороги, що дозволяє зменшити ризик аквапланування, підвищує безпеку дорожнього руху в районах зі значними атмосферними опадами. Завдяки модифікації бітуму, дренажний асфальтобетон забезпечує достатню довговічність, незважаючи на велику кількість пор.

Також іноваційним рішенням є використання самовідновлюваного асфальтобетону [7]. Це сучасний будівельний матеріал, здатний відновлювати свої властивості після появи у шарі дорожнього покриву деформацій. Дана технологія передбачає застосування капсул або мікрочастинок які містять спеціальні хімічні речовини з відновлювальними властивостями, що додаються у структуру асфальтобетону під час приготування. При утворенні тріщин капсули руйнуються, а їхній вміст заповнює пошкодженні місця.

Під час додавання спеціальних добавок полімерів або наноматеріалів дозволяє шару покриву реагувати на зміни температури та самостійно відновлювати свою структуру. Наприклад, бітум з наноматеріалами забезпечує більш ефективне відновлення властивостей за рахунок покращених показників адгезії та еластичності. Такі впровадження значно зменшують необхідність у достроковому ремонті дорожнього покриву.

Фотоактивний цементобетон – це інноваційний матеріал, що використовується в дорожньому будівництві для боротьби із забрудненням повітря [8-9]. Головною особливістю цього цементобетону є наявність у його складі діоксиду титану (TiO_2), який під дією ультрафіолетового випромінювання активує процес фотокаталізу. Завдяки цьому процесу шкідливі речовини, такі як оксиди азоту (NOx), перетворюються на нешкідливі сполуки, що змиваються з поверхні дощовою водою. Автомобільні дороги, побудовані з такого матеріалу, сприяють зниженню концентрації шкідливих викидів у навколишне середовище від транспортних засобів. Матеріал має високу стійкість до атмосферних впливів і механічного зносу. Фотоактивний цеменбетон є перспективною технологією для створення екологічно чистих дорожніх покриттів. Використання данного матеріалу сприятиме зменшенню шкідливих викидів у повітря, покращить екологічну ситуацію у містах та підвищить якість дорожньої інфраструктури.

Розвиток таких технологій дозволить подовжити термін експлуатування автомобільних покривів та знизити витрати на їх утримання.

Екологічні аспекти у дорожньому будівництві.

Екологічні аспекти стають дедалі важливішим фактором у дорожньому будівництві. Використання екологічно чистих матеріалів, впровадження систем водовідведення та зменшення викидів CO_2 під час будівництва, сприяють збереженню навколишнього середовища. Наприклад, створення зелених коридорів уздовж автомобільних доріг, влаштування шумозахисних екранів, тощо.

Окрему увагу слід приділити впровадженню систем моніторингу стану довкілля. Сучасні сенсори дозволяють у режимі реального часу контролювати рівень забруднення повітря, стан ґрунтів і

водних ресурсів. Інтеграція таких систем у дорожню інфраструктуру забезпечить швидке реагування на екологічні зміни.

Фахівцям галузі потрібно враховувати міжнародний досвід у використанні альтернативних джерел енергії у своїх проєктах (наприклад – метеостанціях, лічильниках автоматичного обліку руху, освітленні пішохідних переходів, тощо). Іншим перспективним рішенням є використання енергії вітру та рухомих транспор них засобів для живлення об'єктів дорожньої інффраструктури, таких як світлофори чи станції зарядки електротранспорту [11].

Міжнародні стандарти та міждисциплінарний підхід.

Адаптація до міжнародних стандартів, таких як ISO та EN, дозволяє інтегрувати найкращі практики у процес будівництва автомобільних доріг. Використання світового досвіду та напрацювань науковців дозволить інженерам дорожньої галузі забезпечувати комплексний підхід до вирішення сучасних задач з проєктування та екплуатування автомобільних доріг.

Аналіз та використання міжнародних стандартів забезпечить уніфікацію процесів, полегшить інтеграцію дорожньої галузі України у глобальну транспортну інфраструктуру Європи, що буде сприяти залученню інвестицій та підвищенню конкурентоспроможності України на європейському ринку. Окрім того, використання та впровадження міжнародних стандартів сприятиме покращенню якості дорожньої інфраструктури та позитивного впливу на рівень безпеки дорожнього руху.

Досвід реалізації інновацій у різних країнах.

У світовій практиці накопичено значний досвід використання сучасних підходів у будівництві автомобільних доріг. Наприклад, у Нідерландах активно впроваджуються "розумні дороги", які обладнані спеціальними датчиками для моніторингу руху автомобільного транспорту та стану дорожнього покриву. У США значну увагу приділяють використанню перероблених матеріалів, що дозволяє значно зменшити витрати на будівництво [12].

В Японії застосовують технології, орієнтовані на адаптацію до природних катастроф, таких як землетруси. Це включає будівництво доріг зі спеціальними амортизаційними шарами, які мінімізують ризики пошкоджень під час землетрусів. Такий досвід може бути корисним для країн, які також стикаються зі складними природними умовами [13].

У країнах ЄС активно розвиваються проєкти з використання відновлюваних джерел енергії. Наприклад, у Франції реалізовано проєкт "солярних доріг", які виробляють електроенергію для живлення прилеглих населених пунктів. Вивчення та адаптація таких рішень дозволить значно підвищити ефективність національної транспортної інфраструктури [14].

Розвиток кадрового потенціалу.

Підвищення кваліфікації фахівців є основою для впровадження інновацій у дорожньому будівництві. Регулярне проведення тренінгів, семінарів та участь у міжнародних конференціях сприяють обміну досвідом та освоєнню новітніх технологій. Важливим є також розвиток освітніх програм у вищих навчальних закладах, орієнтованих на підготовку фахівців у галузі дорожнього будівництва.

Залучення молодих науковців до участі у дослідженнях та розробках є ще одним важливим напрямом генерації нової ідей через грантові програми, які підтримують інноваційні ідеї та сприяють їх реалізації у практичній площині.

Висновки. Станом на сьогодні питання комплексного підходу до підвищення фахового рівня науковців та фахівців дорожньої галузі залишається недостатньо розглянутим, що зумовлює виконувати дослідження з інтегрованнням рішень, які поєднують технологічні, економічні та екологічні аспекти.

В Україні необхідно більш активно впроваджувати інноваційні технології, впроваджувати нові матеріали, підтримувати процес адаптації до кращих світових практик та активно розвивати професійні якості фахівців дорожньої галузі. Особливу увагу потрібно приділити на розробку інтегрованих рішень, що поєднують технічні, економічні та екологічні аспекти у дорожньому будівництві з використанням сучасних технологій, інноваційних матеріалів з використанням штучного інтелекту.

Перелік посилань

1. Succar B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in Construction.

2. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., & Rhind D. W. (2015). Geographic Information Systems and Science. Wiley.

3. Ghaffar S. H., Corker J., & Fan M. (2018). *Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. Automation in Construction.*

4. Precast Assembled Road Paving Technology: Progress and Prospects // Journal of Road Construction Studies. – 2022. – Т. 34, № 3. – С. 101–120. – DOI: 10.1016/j.rcs.2022.03.001.

5. Adams M., Green D., & White L. (2021). Automation in smart roads: Development and future directions. *Automation in Construction, 120,* 88-104. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103281.

6. Кравченко О. В. Пористі асфальти для сучасного дорожнього будівництва / О. В. Кравченко // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні технології в дорожньому будівництві». – Київ, 2021. – С. 25–30.

7. Wang H. et al. “Self-healing asphalt for sustainable road infrastructure”. Construction and Building Materials, 2023.

8. Pacheco-Torgal F., Labrincha J. A. "Eco-efficient construction and building materials." Woodhead Publishing, 2014.

9. Guerrini G. L. "Photocatalytic cementitious roads for depollution." *Concrete Journal*, 2010.

10. ISO 20643:2019 – "Recycled aggregates for concrete".

11. Сидоренко М., Іванова О. Використання енергії вітру для живлення світлофорів та зарядних станцій електротранспорту. Енергетика та електрифікація. 2021. 45. – С. 123–134. https://doi.org/10.15223/energtech.2021.45.123.

12. Miller L. G., & Walker J. A. (2021). Economic analysis of using recycled materials in highway pavements. Journal of Environmental Management, 276, 82-93.

13. Nakamura S., & Suzuki R. (2022). Seismic performance of road infrastructure: Lessons from Japan. Earthquake Spectra, 38, 145-159. https://doi.org/10.1193/2116ESX1834.

14. Lefevre P., & Gosselin S. (2019). Integrating solar energy into road infrastructure: The case of solar roads in France. Energy Policy, 134, 1021-1030. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110127.

15. Іваненко І.І. Інноваційні матеріали в дорожньому будівництві // Транспорт України. – 2021. – № 4. – С. 23–27.

16. Петренко П.П. Цифрові технології в інфраструктурних проєктах // Вісник будівництва. – 2020. – № 3. – С. 15–20.

17. Сидоренко О.О. Економічна оптимізація процесів дорожнього будівництва // Дорожні науки. – 2022. – № 2. – С. 45–52.

INCREASING THE PROFESSIONAL LEVEL OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF AUTOMOBILE ROADS

Mundirov Oleksandr M., leading engineer, National Institute of Infrastructure Development, Kyiv, Ukraine, e-mail: mundirovvv@gmail, tel.+380681970634, https://orcid.org/0000-0000-0000-0000.

Raikovskyi Vitaliy F., Candidate of Technical Sciences, Advanced Scientific Researcher, National Institute for Infrastructure Development, Kyiv, Ukraine, vintikntu@ukr.net, tel.+380982846899, https://orcid.org/0000-0002-6391-7647.

Summary. The paper considers the issue of increasing the professional level of scientific and technical support, primarily with improving approaches to the design and construction of highways in modern conditions.

The task has been set to identify the key aspects of advancing the scientific and technical level of the design and development of highways. Zokrem, analyzes current design methods, the promotion of innovative technologies and the importance of an interdisciplinary approach. The need to adapt to international standards and ensure professional development of facists is discussed.

Particular attention is paid to the environmental aspect, digital tools such as BIM and GIS, and their role in increased process efficiency. Recommendations have been made to improve the scientific and technical support, aimed at improving the speed and efficiency of road traffic. Significant respect is given to international evidence, which allows for the integration of best practices in the domestic context.

Keywords: scientific and technical support, highways, design, construction, innovations, international standards, BIM technologies, geographic information systems (GIS), additive technologies - AM, environmental aspect, human resources potential.

References

1. Succar B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in Construction.

2. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., & Rhind D. W. (2015). Geographic Information Systems and Science. Wiley.

3. Ghaffar S. H., Corker J., & Fan M. (2018). Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. Automation in Construction.

4. Precast Assembled Road Paving Technology: Progress and Prospects // Journal of Road Construction Studies. – 2022. – T. 34, № 3. – C. 101–120. – DOI: 10.1016/j.rcs.2022.03.001.

5. Adams M., Green D., & White L. (2021). Automation in smart roads: Development and future directions. *Automation in Construction, 120,* 88-104. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103281.

6. Kravchenko O. V. Porous asphalt for frequent road construction / O. V. Kravchenko // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Random Technologies in Road Buddhism". - Kyiv, 2021. - 25-30.

7. Wang H. et al. “Self-healing asphalt for sustainable road infrastructure”. Construction and Building Materials, 2023.

8. Pacheco-Torgal F., Labrincha J. A. "Eco-efficient construction and building materials." Woodhead Publishing, 2014.

9. Guerrini G. L. "Photocatalytic cementitious roads for depollution." *Concrete Journal*, 2010.

10. ISO 20643:2019 – "Recycled aggregates for concrete".

11. Sidorenko M., Ivanova O. Using wind energy to power traffic lights and charging stations for electric transport. Energy and electrification. 2021. 45. – 123–134.

12. Miller L. G., & Walker J. A. (2021). Economic analysis of using recycled materials in highway pavements. Journal of Environmental Management, 276, 82-93.

13. Nakamura S., & Suzuki R. (2022). Seismic performance of road infrastructure: Lessons from Japan. Earthquake Spectra, 38, 145-159. https://doi.org/10.1193/2116ESX1834.

14. Lefevre P., & Gosselin S. (2019). Integrating solar energy into road infrastructure: The case of solar roads in France. Energy Policy, 134, 1021-1030. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110127.

15. Ivanenko I. I. (2021). Innovative materials in road construction. Transport of Ukraine, (4), 23–27.

16. Petrenko P. P. (2020). Digital technologies in infrastructure projects. Bulletin of Construction, (3), 15–20.

17. Sydorenko O. O. (2022). Economic optimization of road construction processes. Road Sciences, (2), 45–52.

УДК 625.7/.8 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-113-125**
UDC 625.7/.8

ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ РЕМОНТУ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИВУ

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF THE CURRENT METHODS OF ASPHALT PAVEMENT REPAIR



Невінгловський Вадим Федорович, *кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: nevinglovskiy@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-0113-1822



Клімашевський Олександр Олександрович, *аспірант, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: klimashevskii2507@gmail.com,*

https://orcid.org/0009-0007-3385-1994

Анотація: У сучасних умовах зменшення обсягів робіт з будівництва, реконструкції та ремонтів автомобільних доріг загального користування, на перше місце виходить експлуатаційне утримання, як єдиний інструмент забезпечення належного експлуатаційного стану автомобільних доріг та комфортних і безпечних умов руху.

Враховуючи відсутність у достатній кількості бюджетних асигнувань та неритмічність наявного фінансування, виникає актуальна потреба у зваженому прийнятті рішень щодо застосування тої чи іншої технології ремонту покриву з урахуванням усіх переваг та недоліків. Неналежний експлуатаційний стан автомобільних доріг впливає, в першу чергу на швидкість і вартість логістики.

Основні задачі, що були поставлені перед роботою є: провести аналіз використання існуючих методів ремонту асфальтобетонного покриву автомобільних доріг загального користування; дослідити досвід ремонтів асфальтобетонного покриву України та інших країн; визначити основні переваги та недоліки найбільш поширених методів ремонту асфальтобетонного покриву в Україні.

Під час виконання роботи було проаналізовано нормативні документи, що регламентують вимоги до експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування, зокрема, щодо матеріалів та методів з ремонту асфальтобетонного покриву.

Проведено аналіз обсягів виконаних робіт за період 2018-2024 років на міжнародних, національних та територіальних дорогах державного значення. Опрацьовано результати досліджень вітчизняних та зарубіжних авторів. Вивчено досвід виконання робіт з ліквідації вибоїн асфальтобетонного покриву в інших державах. Визначено основні переваги та недоліки найбільш поширених методів ліквідації вибоїн в Україні.

Під час виконання роботи, опрацьовано нормативні документи, що регламентують вимоги до методів ремонту та матеріалів, визначено основні переваги та недоліки методів ремонту асфальтобетонного покриву. Запропоновано продовжити дослідження, з метою удосконалення пневмоструменевого методу, як одного з найефективніших на сьогоднішній день.

Ключові слова: автомобільна дорога, вибоїна, експлуатаційне утримання, покрив, пневмоструменевий метод, ремонт.

Вступ. Із початком повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України, дорожнє господарство разом із іншими критичними галузями, було змушене призупинити роботи з будівництва, реконструкції та капітальних ремонтів.

Однак, враховуючи необхідність підтримання в належному експлуатаційному стані важливих логістичних маршрутів та забезпечення безпечних умов руху для користувачів автомобільних доріг загального користування, експлуатаційне утримання доріг посідає основну роль у вирішенні даних завдань.

Відповідно до оприлюднених Державним агентством відновлення та розвитку інфраструктури України даних [1], станом на 01.01.2022 на балансі регіональних Служб відновлення та розвитку інфраструктури перебувало 43 043,4 км автомобільних доріг загального користування державного значення. Їхній розподіл за видами, технічними категоріями та типом покриву наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Протяжність автомобільних доріг загального користування державного значення [1].

Table 1 – Length of public roads of state importance

Найменування областей і види автомобільних доріг державного значення	Всього доріг, км	Всього твердого покриву, км	В тому числі по типах покриву, км					% твердого покриву	Гуртові, км	Розподілення доріг з твердим покривом по категоріях, км				
			цементобетонні	асфальтобетонні	чорні шосе	білі щебеневі,	бруківки			I	II	III	IV	V
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*
ВСЬОГО по УКРАЇНІ *(на підконтрольній території - 43 043,4 км / на непідконтрольній - 3 586,7 км)*	**46630,1**	**46609,5**	**907,2**	**32957,1**	**11643,9**	**519,6**	**581,7**	**100,0**	**20,6**	**2811,5**	**13004,3**	**18856,3**	**11759,2**	**178,2**
із них: міжнародні *(8 443,2 км / 879,2 км)*	**9322,4**	**9322,4**	**447,5**	**8647,8**	**221,0**	**0,0**	**6,1**	**100,0**	**0,0**	**2086,0**	**5557,6**	**1494,1**	**174,2**	**10,5**
національні *(6 592,5 км / 577,8 км)*	**7170,3**	**7170,3**	**182,8**	**6421,0**	**551,9**	**14,5**	**0,1**	**100,0**	**0,0**	**608,7**	**4051,7**	**2275,0**	**234,9**	**0,0**
регіональні *(8100,2 км / 568,5 км)*	**8668,7**	**8665,7**	**132,0**	**6429,0**	**1956,6**	**96,5**	**51,6**	**99,97**	**3,0**	**64,8**	**2022,0**	**4659,0**	**1 916,4**	**3,5**
територіальні *(19 907,5 км / 1561,2км)*	**21468,7**	**21451,1**	**144,9**	**11459,3**	**8914,4**	**408,6**	**523,9**	**99,92**	**17,6**	**52,0**	**1373,0**	**10428,2**	**9 433,7**	**164,2**

Відповідно до [2], експлуатаційне утримання автомобільних доріг – комплекс робіт з обстеження (оглядів) та утримання автомобільних доріг, дорожніх споруд та смуги відведення, а враховуючи обмежене фінансування – це підтримка доріг у стані, придатному для пересування транспорту.

Отже, враховуючи відхилення від основних завдань (збереження автомобільних доріг та підтримка їх транспортно-експлуатаційних показників) балансоутримувачів доріг, їхня основна увага останніми роками, сконцентрована на експлуатаційному утриманні автомобільних доріг, а саме на ліквідації деформацій та руйнувань.

Здебільшого, такий перехід зумовлений відсутністю фінансування в достатній кількості, що призвело до недотримання міжремонтних термінів, неможливості здійснення реконструкції та ремонтів автомобільних доріг.

З метою раціонального застосування трудових, матеріальних і фінансових ресурсів, виникає потреба більш детально розглянути існуючі методи ремонту (ліквідації вибоїн) асфальтобетонного покриву доріг та визначити умови, при яких той чи інший метод є більш ефективним.

Виклад основного матеріалу. Утворення вибоїн, в основному, спричинене запізнілою реакцією на усунення поширених дефектів дорожнього покриву на початковій стадії їхнього розвитку. Найпоширенішою проблемою, пов'язаною з подальшим утворенням вибоїн, є тріщиноутворення, результатом якого є комплекс факторів впливу під час експлуатації дорожнього покриву. Наприклад, поздовжні тріщини виникають вздовж смуг накату, внаслідок значного навантаження від коліс транспортних засобів і пов'язані з жорсткістю асфальтобетонного покриву та його втомними характеристиками. У результаті утворення тріщин, а також відсутності вчасної санації цих тріщин (заливання бітумними мастиками), проникання води в поверхневий шар покриву прискорює процес руйнування через різні механізми, починаючи від розшарування і закінчуючи циклами замерзання-відтавання. Якщо вчасно усунути такі пошкодження, утворення вибоїн часто можна відтермінувати і навіть уникнути.

Хоча більшість руйнувань виникають на поверхні дорожнього одягу, у багатьох випадках причини їхні причини їх утворення пов'язані з основою конструкції дорожнього одягу, виправити які дуже складно та дороговартісно. У таких випадках оперативний ремонт може лише відтермінувати появу вибоїн, але не запобігти їх виникненню. Лише поєднання міцної структурної системи дорожнього одягу та своєчасних заходів з експлуатаційного утримання дозволяє повністю уникнути або відтермінувати утворення вибоїн [3].

Про це, а також про важливість виконання профілактичних заходів з ремонту покриву у міжремонтний період, йдеться у дослідженні авторів публікації [4]. На думку авторів, всі дорожні покриви рано чи пізно руйнуються. Очевидно, що в першу чергу це залежить від конструкції дорожнього одягу, а метою профілактичних робіт є подовження строку функціонування дорожнього покриву таким чином, щоб він прослужив не тільки повний розрахунковий строк експлуатації, але навіть і довше. На рис. 1 приведена типова крива руйнування дорожнього покриву. Авторами зроблено висновок, що вибір виду робіт з ремонту або утримання залежить від міцності конструкції, стану покриву та характеру руйнувань.

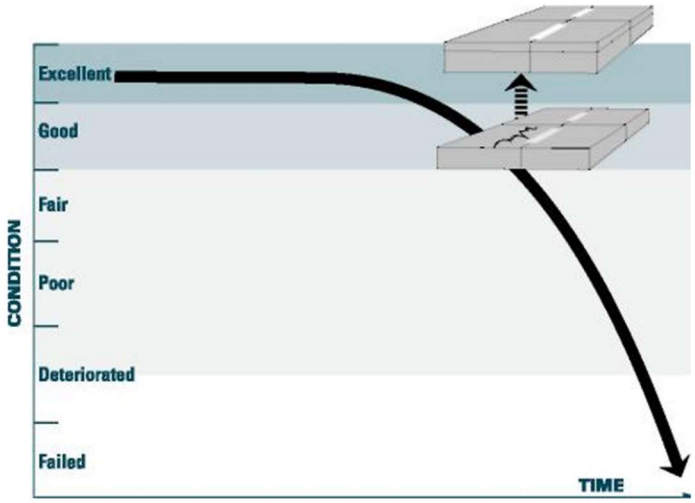


Рисунок 1 – Крива деградації покриву [4]
Figure 1 – Degradation curve of the surface

Щороку, підрядні організації, які займаються експлуатаційним утриманням автомобільних доріг, забезпечують на належному рівні безпеку руху, в тому числі шляхом ліквідації вибоїн дорожнього покриву. За опублікованими статистичними даними Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України [5], за період із 2018 року по 2024 рік, на дорогах загального користування державного значення, зокрема на міжнародних, національних та регіональних, було ліквідовано 22 377 220,20 м² вибоїн, що в перерахунку відповідає площі покриву на протяжності 2983,629 км автомобільної дороги II технічної категорії.

Відомості щодо ліквідації вибоїн на міжнародних, національних та регіональних автомобільних дорогах наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Інформація про хід ліквідації вибоїн на міжнародних, національних та регіональних автомобільних дорогах державного значення

Table 2 – Information on the progress of pothole repair on international, national and regional roads of national importance

Рік	Обсяг вибоїн ямковості, м²			
	Всього	В тому числі на дорогах:		
		міжнародні	національні	регіональні
1	2	3	4	5
2024	2 691 614,5	845 307,30	602 745,30	1 243 561,90
2023	2 798 366,7	1 063 576,2	592 720,4	1 142 070,1
2022	3 167 476,2	731 740,9	590 836,3	1 844 899,0
2021	2 620 223,3	853 491,6	694 659,5	1 072 072,2
2020	3 355 245,5	Дані відсутні		
2019	4 582 124,0			
2018	3 162 170,0			
Разом:	22 377 220,20			

Графічне зображення розподілу обсягів ліквідації вибоїн в розрізі типів доріг за період 2021-2024 років, наведено на рис. 2.

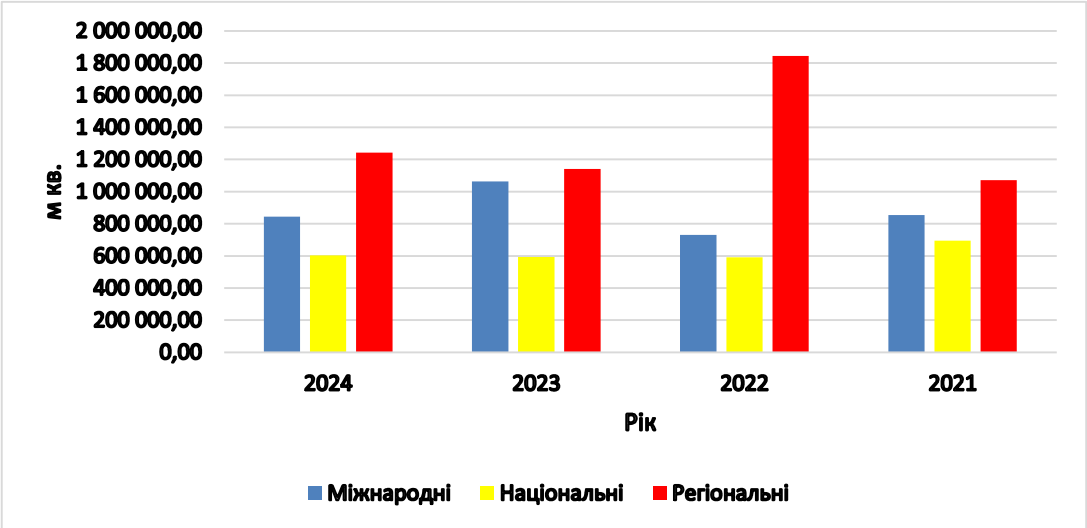


Рисунок 2 – Обсяги ліквідації ямковості за 2021-2024 роки, в розрізі типів доріг

Figure 2 – Volumes of pothole repair in 2021-2024, by road type

Основним нормативним документом, що регламентує роботи з ліквідації вибоїн є [6]. Цей стандарт поширюється на виконання робіт з ліквідації руйнувань у вигляді вибоїн покриву нежорсткого дорожнього одягу на автомобільних дорогах загального користування.

Відповідно до [6] визначено 7 груп дорожньо-будівельних матеріалів, що можуть бути застосовані при ліквідації вибоїн, а саме:

Група I - гарячі асфальтобетонні суміші;
Група II - холодні асфальтобетонні суміші;
Група III- литі асфальтобетонні суміші;
Група IV - бітумомінеральні суміші (гарячі та холодні);
Група V - матеріали, що застосовують при пневмоструменевому методі ремонту;
Група VI - суміші з асфальтогранулятом;
Група VII - матеріали, що застосовують при ремонті методом просочення.

У свою чергу, доцільно поділити дані групи матеріалів, а відповідно і технології за сезонністю їх застосування, як зображено на рис. 3.

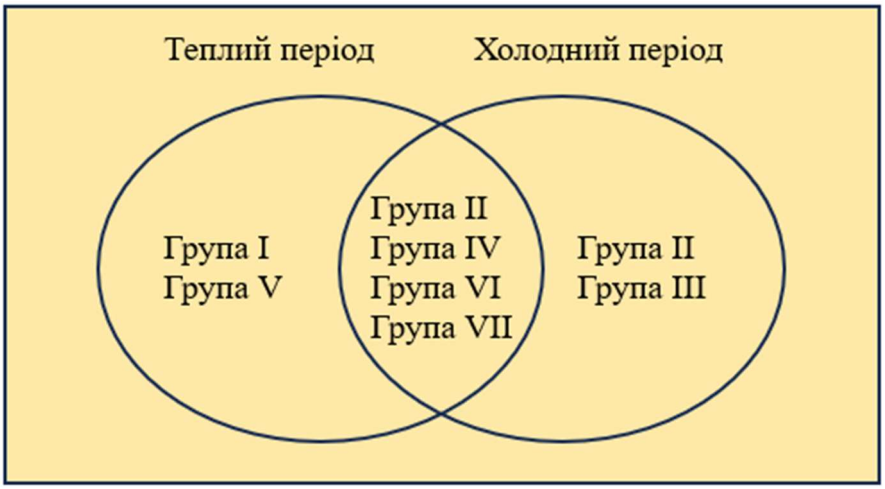


Рисунок 3 – Розподіл матеріалів для ліквідації вибоїн за періодом використання
Figure 3 – Distribution of pothole repair materials by period of use

Слід відзначити, що традиційно в Україні набули поширення технології ліквідації вибоїн із застосуваннями гарячих асфальтобетонних сумішей (Група I), холодних бітумомінеральних сумішей (Група IV) та пневмоструменевим методом (Група V).

Подібні висновки у своїх дослідженнях зробили також науковці з Університету Бредлі [7]. Автори виділяють чотири найпоширеніші методи ліквідації вибоїн - це «кидковий», «кидково-укочувальний», «частковий» та «ін'єкційний». «Кидковий» метод або «кидай і їдь», є найпоширенішим методом ліквідації вибоїн, оскільки матеріал можна швидко укласти, а його вартість є низькою. Даний метод є подібним до нашої технології (спрощеної) ліквідації вибоїн з використання холодних бітумомінеральних сумішей. Кращою альтернативою методу «кидай і їдь» є метод «кидай і укочуй». При використанні методу «кидання і укочення» матеріал засипається лопатою в непідготовлену вибоїну і ущільнюється за допомогою шин ремонтної вантажівки. «Частковий» метод ремонту вибоїн часто вважається найкращим методом (окрім повної заміни покриву пошкодженої ділянки), і за складом робіт відповідає ліквідації вибоїн гарячою асфальтобетонною сумішшю з холодним

фрезеруванням. Використовуючи «частковий метод», вибоїну спочатку очищають від води та сміття, а місце ремонту доводять до правильних геометричних форм. Потім матеріал укладається в зону ремонту і ущільнюється за допомогою обладнання, такого як віброплити або віброкотки. Використовуючи даний метод ремонту, матеріал ущільнюється і забезпечує відносну довговічність. «Ін'єкційний» метод, або метод напилення є ідентичним до відомого нам пневмоструменевого методу.

На думку дослідників [8], матеріали та технології для ліквідації вибоїн повинні бути оцінені за допомогою процедури сертифікації перед використанням, оскільки великі обсяги робіт роблять перевірку якості виконаних робіт довготривалою недоцільною. Основними вимогами до матеріалів, які необхідно оцінити для забезпечення довговічності, є наступні:

1. Стандартні властивості матеріалів для ліквідації вибоїн, де основними показниками є:
- стійкість до деформації;
- гранулометричний склад;
- пористість;
- водонасичення;
- спорідненість до в'яжучого.
2. Ущільнюваність в несприятливих умовах.
3. Час схоплювання/затвердіння перед початком руху.
4. Чутливість до умов експлуатації.
5. Адгезія – показник зчеплюваності.
6. Придатність до вторинної переробки.

Відповідно до [9], роботи з ремонту покриву, улаштованого з асфальтобетонних сумішей, проводять, як правило, гарячими асфальтобетонними сумішами приблизно того ж складу, що і покрив, але перевага надається типам В, Г і Д, за температури повітря не нижче плюс 5 ºС навесні та 10 ºС восени.

Ця технологія набула поширення в Україні завдяки розгалуженій мережі асфальтобетонних заводів, щебеневих кар'єрів та наявності власних нафтопереробних заводів, що забезпечують виробництво бітумів.

Технологічна послідовність виконання робіт з ліквідації вибоїн покриву гарячими асфальтобетонними сумішами наступна:

1. Огородження місця виконання робіт.
2. Підготовка ремонтної карти:
    - холодне фрезерування;
    - обрізання контурів карти;
    - очищення дна та стінок карти від пилу, бруду та залишків старого матеріалу;
    - підґрунтовка дна та стінок карти бітумом або бітумною емульсією.
3. Укладання гарячої асфальтобетонної суміші.
4. Ущільнення укладеного матеріалу.
5. Прибирання залишків матеріалу з покриву та засобів організації дорожнього руху.

Основні технологічні операції при ліквідації вибоїн гарячою асфальтобетонною сумішшю та їх послідовність наведені на рис. 4.



а) б) в)

г) д) е)

Рисунок 4 – Основні технологічні операції при ліквідації вибоїн гарячими асфальтобетонними сумішами та їх послідовність: а) холодне фрезерування; б) очищення ремонтної карти; в) обрізання контурів; г) піґрунтовка; д) укладання асфальтобетонної суміші; е) ущільнення асфальтобетонної суміші

Figure 4 – The main technological operations for pothole repair with hot asphalt mixtures and their sequence: a) cold milling; b) cleaning the repair map; c) cutting contours; d) priming; e) paving asphalt mix; f) compaction of asphalt mix

Основними перевагами даної технології є:

- забезпечення порівняно високого строку експлуатації ремонтної карти;
- можливість виконання робіт на площі до 25 м²;
- рух можна відновити відразу після завершення робіт;
- продуктивність робочої бригади робітників складає до 150 м² за зміну.

Проте, технологія ліквідації вибоїн гарячими асфальтобетонними сумішами має і свої недоліки:

- висока витрата трудових ресурсів;
- обмеженість у відстані та часі транспортування суміші;
- температурний режим влаштування та ущільнення суміші;
- велика кількість технологічних операцій;
- неможливість виконання робіт за несприятливих погодних умов.

Холодні асфальтобетонні суміші здебільшого використовуються для тимчасового ремонту, але за умови правильного укладання вони можуть бути довговічнішими.

Відповідно до [6], технологічна послідовність виконання робіт з ліквідації вибоїн покриву холодними бітумомінеральними сумішами аналогічна до робіт з використанням гарячих асфальтобетонних сумішей.

До переваг даного методу слід віднести:
- швидкість укладання;
- можливість виконання робіт за спрощеною технологію (без підготовки місць ремонту);
- можливість виконання робіт за несприятливих погодних умов.

Основним недоліком цих матеріалів є те, що вони не можуть бути ущільнені до того ж рівня, що й гарячі асфальтобетонні суміші. Враховуючи, що в якості в'яжучого використовується бітум, з ним може бути важко працювати при низьких температурах, і він часто вимагає деякого часу для прогріву перед використанням. Також, не менш важливим недоліком є низька продуктивність – не більше 30 м² за зміну та висока вартість матеріалу [10].

За результатами проведених раніше досліджень [11] холодні асфальтобетоні та холодні бітумомінеральні суміші з використанням активних домішок рекомендується застосовувати при температурах в діапазоні від +5 °С до –5 °С, витримавши перед використанням при температурі не меншій 15 °С протягом 10-15 годин.

Крім того, автори [11] зазначають, що основними вимогами для вибору технології проведення ремонтних робіт при несприятливих умовах та при низьких температурах є забезпечення високої адгезії (показника зчеплюваності) укладеного матеріалу до ремонтованої поверхні покриву та необхідної щільності укладеного шару матеріалу після його ущільнення.

Основні технологічні операції з ліквідації вибоїн холодною бітумомінеральною сумішшю та їх послідовність наведено на рис. 5.

Останній і найновіший серед розглянутих в даній статті методів, є пневмоструменевий метод ліквідації вибоїн. Даний метод є найбільш простим серед розглянутих і щороку набуває все більшого обсягу застосування на автомобільних дорогах загального користування.

Пневмоструменевий метод є єдиним із запропонованих, що потребує залучення спеціальної установки безпосередньо на місці виконання робіт, яка забезпечує змішування під тиском у необхідних пропорціях бітумної емульсії та щебеню для подальшого заповнення цією сумішшю вибоїни.

Згідно з вимогами [6], технологічна послідовність виконання таких робіт наступна:
- очищення вибоїни повітрям під тиском;
- підґрунтовка поверхні вибоїни бітумною емульсією;
- приготування та заповнення вибоїни щебеневої сумішшю, обробленою бітумною емульсією;
- кінцева засипка поверхні місця ремонту необробленою щебеневою сумішшю.



а) б) в) г)

Рисунок 5 – Основні технологічні операції при ліквідації вибоїн холодною бітумомінеральною сумішшю та їх послідовність: а) надання вибоїні правильної геометричної форми; б) прогрівання дна та стінок вибоїни; в) укладання бітумомінеральної суміші; г) ущільнення бітумомінеральної суміші

Figure 5 – The main technological operations for pothole repair with cold bituminous mineral mix and their sequence: a) giving the pothole the correct geometric shape; b) heating the bottom and walls of the pothole; c) laying the bituminous mineral mix; d) compaction of the bituminous mineral mix

Основні технологічні операції з ліквідації вибоїн пневмоструменевим методом та їх послідовність наведено на рис. 6.



а) б) в)

Рисунок 6 – Основні технологічні операції при ліквідації вибоїн пневмоструменевим методом та їх послідовність: а) очищення вибоїни та підґрунтовка поверхні вибоїни бітумною емульсією; б) розподілення щебеневої суміші, обробленої бітумною емульсією; в) кінцева засипка місця ремонту

Figure 6 – The main technological operations for pothole repair using the pneumatic jet method and their sequence: a) pothole cleaning and undercoating the pothole surface with bitumen emulsion; b) distribution of crushed stone mixture treated with bitumen emulsion; c) final backfilling of the repair site

Серед основних переваг пневмоструменевого методу можна виділити наступні:

- висока продуктивність виконання робіт у порівнянні з попередньо розглянутими двома методами;
- порівняно незначна потреба в людських ресурсах;
- можливість виконання робіт за несприятливих погодних умов (при вологому покритті);
- надійна гідроізоляція, що підвищує строк служби дорожнього одягу;
- простота технологічних процесів;
- відсутність потреби у доведенні місця ремонту до правильної геометричної форми, що не збільшує площу ремонту та усуває можливість додаткової витрати ремонтного матеріалу;
- виконання робіт одним основним механізмом.

Серед основних недоліків даного методу можна виділити:

- велику вартість механізму та особливості його обслуговування;
- обмеженість можливості виконання робіт по глибині та площі вибоїни;
- відсутність чітко визначених вимог до дозування щебеню та емульсії;
- високу імовірність впливу людського фактору на якість робіт;

За результатами аналізу переваг та недоліків розглянутих методів ремонту асфальтобетонного покриву, враховуючи актуальність питання довговічності виконуваних робіт, було прийнято рішення провести подальші дослідження з метою удосконалення технології з ліквідації вибоїн пневмоструменевим методом.

З метою порівняння зазначених технологій та вибору оптимального методу та матеріалу для ліквідації вибоїн, було здійснено порівняльний аналіз на основі методу зважених оцінок [12]. Процес застосування методу зважених оцінок включає в себе призначення ваги для кожного критерію, після чого робиться обчислення на основі цієї ваги та оцінок (де 1 – найгірше, 5 – найкраще) для прийняття обґрунтованого рішення. Тобто, особа, що приймає рішення, самостійно визначає критерії, за якими порівнює альтернативи та їх вагу для прийняття рішення.

Результати вибору матеріалу за методом зважених оцінок наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Матриця рішень

Table 3 – Decision matrix

Критерій	**Вага**	**Оцінювання**					
		Гарячі суміші		**Холодні суміші**		**Пневмо-струменевий метод**	
		оцінка	**вага**	**оцінка**	**вага**	**оцінка**	**вага**
Кількість трудовитрат	5	3	15	2	10	5	25
Кількість технологічних операцій	4	3	12	3	12	5	20
Сезонність виконання робіт	4	4	16	5	20	3	15
Продуктивність	5	3	15	2	10	5	25
Наявність технологічних обмежень	3	4	12	5	15	4	12
Σ	-	-	70	-	67	-	97

За результатами порівняння, встановлено, що пневмоструменевий метод є найбільш ефективним при врахуванні критеріїв, що були обрані в якості визначальних.

Висновки

На сьогоднішній день експлуатаційне утримання залишається єдиним дієвим інструментом забезпечення відповідності транспортно-експлуатаційних показників вимогам чинних нормативних документів та безпечних і комфортних умов для всіх учасників дорожнього руху [13].

Значний обсяг фінансування по експлуатаційному утриманню спрямовується саме на ліквідацію деформацій та руйнування покриву автомобільних доріг. Найпоширенішим видом руйнувань є вибоїни, що виникають в наслідок відсутності профілактичних заходів (заливання тріщин, влаштування тонкошарових покриттів тощо), динамічного навантаження від рухомого складу, втрати фізико-механічних властивостей матеріалів покриву, водно-теплового режиму та ін.

У ході виконання даної дослідної роботи, було визначено три основні методи ремонту покриву асфальтобетонних доріг (так званий «ямковий ремонт»): із застосуванням гарячих асфальтобетонних сумішей, холодних бітумомінеральних сумішей та пневмоструменевим методом.

Проаналізовані в роботі результати досліджень [3] та [7] підтверджують, що дані методи є найбільш поширеними і за межами України.

За результатом аналізу обраних методів ремонту асфальтобетонного покриву доріг було визначено основні переваги та недоліки кожного із них і зроблено висновок про те, що пневмоструменевий метод є найбільш ефективним серед наявних на сьогоднішній день, однак має такі недоліки як обмеженість можливості виконання робіт по глибині та площі вибоїни, відсутність чітко визначених вимог до дозування щебеню та емульсії.

Враховуючи вищенаведене, є доцільним продовжити дослідження, з метою удосконалення пневмоструменевого методу ліквідації вибоїн покриву та розширення галузі його застосування, підвищення якості та довговічності ремонтних робіт.

Перелік посилань

1. Дані щодо техніко-експлуатаційного стану автомобільних доріг загального користування державного значення в розрізі автомобільних доріг, у тому числі із зазначенням категорії, пікетної прив'язки автомобільної дороги, геометричних та технічних характеристик, показників рівності та міцності, обсяг руйнувань, URL:https://data.gov.ua/dataset/beca8aa5-96a9-46be-ade7-f1b400213af5 (дата звернення 10.02.2025).

2. ДСТУ 8747:2017 Автомобільні дороги. Види та переліки робіт з ремонтів та експлуатаційного утримання, Київ, 2017.

3. Marasteanu Mihai, Ghosh Debaroti, Turos Mugur, Hartman Marcella, Milavitz Rose, Le Jia-Liang; University of Minnesota. Dept. of Civil, Environmental, and Geo-Engineering,
Tech Report «Pothole Prevention and Innovative Repair», 2018, URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/36064.

4. Кушнір О.В., Катукова В.М., Кулак Є.М. Моніторинг нових технологій і матеріалів для ремонту і утримання автомобільних доріг. Дороги і мости. Київ, 2010. Вип. 12. С. 74-80 (http://dorogimosti.org.ua/files/ upload/4U_13.pdf).

5. Інформація про хід ліквідації ямковості на основних дорогах міжнародного, національного та регіонального значення URL:https://data.gov.ua/dataset/6c0360ff-dd73-43e0-a224-278e315a632c (дата звернення 10.02.2025).

6. ДСТУ-Н Б В.3.2-5:2016 Настанова з ліквідації вибоїн покриття нежорсткого дорожнього одягу автомобільних доріг, Київ, 2016.

7. Matthew Sainz. «Pothole Patching: A Review on Materials and Methods»: IAPA Scholarship Submission 2016, https://www.il-asphalt.org/index.php/download_file/view/316/312/

8. Transport Research Arena, Paris, 2014, Durable Pothole Repairs, URL: https://doi.org/10.1002/9781119318583.ch23.

9. П-Г.1-218-113:2009 Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України, Київ, 2009.

10. База даних цін на матеріальні ресурси, URL:https://prices.nidi.org.ua/sum/ (дата звернення 18.02.2025).

11. Мозговий В.В., Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Аксьонов С.Ю., Білан О.О. Аналіз застосування холодних асфальтобетонів підвищеної коліестійкості для аварійного ремонту в екстремальних погодніх умовах. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науково-технічний збірник. Київ: НТУ, 2014. Вип. 91. С. 52-75.

12. Прийняття рішень методом зважених оцінок, URL:https://training.qatestlab.com/blog/technical-articles/weighted-scoring-by-the-method-of-weighted-estimates/#:~:text=%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%20%D0%B7%D0%B2%D0%B0%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%85%20%D0%BE%D1%86%D1%96%D0%BD%D0%BE%D0%BA%20Weighted%20Scoring,%D0%B0%D0%B1%D0%BE%20%D0%B2%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D0%B2%20%D0%BD%D0%B0%20%D0%BA%D1%96%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%B2 (дата звернення 20.02.2025).

13. Про затвердження Порядку використання коштів, передбачених у державному бюджеті для розвитку мережі та утримання автомобільних доріг загального користування у 2025 році: Постанова Кабінет Міністрів України від 18 лютого 2025 р. № 174 / База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/174-2025-%D0%BF#Text (дата звернення 21.02.2025).

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF THE CURRENT METHODS OF ASPHALT PAVEMENT REPAIR

Nevinhlovskyi Vadym F., PhD ((Candidate of Technical Science), National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: nevinglovskiy@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-0113-1822

Klimashevskiy Oleksandr O., PhD student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: klimashevskii2507@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-3385-1994

Summary. In the current conditions of reducing the volume of works on construction, reconstruction and repair of public roads, operational maintenance comes first as the only tool to ensure proper operational condition of roads and comfortable and safe traffic conditions.

Given the lack of enough budgetary resources and the irregularity of available funding, there is an urgent need for balanced decisions on the use of a particular pavement repair technology, taking into account all the advantages and disadvantages. The unsatisfactory maintenance of roads primarily affects the speed and cost of logistics.

The main tasks set for the work are: to analyze the use of current methods of repairing asphalt pavement of public roads; to study the experience of repairing asphalt pavement in Ukraine and other countries; to identify the main advantages and disadvantages of the most common methods of repairing asphalt pavement in Ukraine.

In the course of the work, we were analyzing the regulatory documents governing the requirements for the operational maintenance of public roads, in particular, regarding materials and methods for repairing asphalt pavement.

An analysis of the volume of work performed for the period 2018-2024 on international, national and territorial roads of state importance was carried out. The results of research by national and foreign authors have been processed. The experience of performing pothole repair works in other countries is studied. The main advantages and disadvantages of the most common methods of pothole elimination in Ukraine are determined.

In the course of the work, the regulatory documents governing the requirements for repair methods and materials were processed, the main advantages and disadvantages of asphalt pavement repair methods were

determined. It is proposed to continue the research in order to improve the pneumatic jet method as one of the most effective to date.

Keywords: road, pothole, operational maintenance, pavement, injection method, repair.

References

1. Data on the technical and operational state of public roads of national importance in the context of highways, including the category, picket binding of the road, geometric and technical characteristics, indicators of evenness and strength, the amount of destruction, URL: https://data.gov.ua/dataset/beca8aa5-96a9-46be-ade7-f1b400213af5 (accessed 10.02.2025).

2. DSTU 8747: 2017 Roads. Types and lists of repair and maintenance works, Kyiv, 2017 [in Ukrainian].

3. Marasteanu Mihai, Ghosh Debaroti, Turos Mugur, Hartman Marcella, Milavitz Rose, Le Jia-Liang; University of Minnesota. Dept. of Civil, Environmental, and Geo-Engineering, Tech Report «Pothole Prevention and Innovative Repair», 2018, URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/36064.

4. Kushnir O.V., Katukova V.M., Kulak E.M. Monitoring of new technologies and materials for the repair and maintenance of roads. Roads and bridges. Kyiv, 2010. Issue 12. S. 74-80 (http://dorogimosti.org.ua/files/ upload/4U_13.pdf) [in Ukrainian].

5. Information on the progress of pothole repair on major roads of international, national and regional importance URL: https://data.gov.ua/dataset/6c0360ff-dd73-43e0-a224-278e315a632c (accessed 10.02.2025) [in Ukrainian].

6. DSTU-N B V.3.2-5:2016 Guidelines for the elimination of potholes in non-rigid pavement of highways, Kyiv, 2016 [in Ukrainian].

7. Matthew Sainz. «Pothole Patching: A Review on Materials and Methods»: IAPA Scholarship Submission 2016, https://www.il-asphalt.org/index.php/download_file/view/316/312/.

8. Transport Research Arena, Paris, 2014, Durable Pothole Repairs, URL: https://doi.org/10.1002/9781119318583.ch23.

9. P-G.1-218-113:2009 Technical rules for repair and maintenance of public roads of Ukraine, Kyiv, 2009 [in Ukrainian].

10. Database of prices for material resources, URL: https://prices.nidi.org.ua/sum/ (accessed 18.02.2025) [in Ukrainian].

11.11. Mozgovyi V.V., Onishchenko A.M., Garkusha M.V., Aksenov S.Y., Bilan O.O. Analysis of the use of cold asphalt concrete with increased rutting resistance for emergency repairs in extreme weather conditions. Automobile roads and road construction: scientific and technical collection. Kyiv: NTU, 2014. Issue 91. S. 52-75 [in Ukrainian].

12. Decision-making by the method of weighted estimates, URL:https://training.qatestlab.com/blog/technical-articles/weighted-scoring-by-the-method-of-weighted-estimates/#:~:text=%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%20%D0%B7%D0%B2%D0%B0%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%85%20%D0%BE%D1%86%D1%96%D0%BD%D0%BE%D0%BA%20Weighted%20Scoring,%D0%B0%D0%B1%D0%BE%20%D0%B2%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D0%B2%20%D0%BD%D0%B0%20%D0%BA%D1%96%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%B2 (дата звернення 20.02.2025) [in Ukrainian].

13. On approval of the Procedure for the use of funds provided for in the state budget for the development of the network and maintenance of public roads in 2025: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 18 February 2025 No. 174 / Database of Legislation of Ukraine / Verkhovna Rada of Ukraine. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/174-2025-%D0%BF#Text (accessed 21.02.2025) [in Ukrainian].

УДК 625.731 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-126-136**
UDC 625.731

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ ОСНОВИ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ НА ПОКАЗНИКИ МІЦНОСТІ І ДЕФОРМАТИВНОСТІ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ

STUDY OF THE INFLUENCE OF SUBGRADE SOIL MOISTURE ON THE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF PAVEMENT STRUCTURE



Петрович Володимир Васильович, *кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: petrovichvv60@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-0422-2535



Касай Костянтин Іванович, аспірант, *Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: kasai2709@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-3292-3339

Анотація: У статті досліджено вплив вологості ґрунту основи дорожнього одягу на показники міцності і деформативності конструкції дорожнього одягу.

Актуальність. В Україні близько 99 % автомобільних доріг мають нежорсткий дорожній одяг, тобто конструкція якого містить шари, міцність яких залежить від температури, вологості та часу дії навантаги. Вологість ґрунту основи дорожнього одягу є одним із тих чинників від якого залежить надійність його конструкції і довговічність експлуатування. Питання забезпечення надійної роботи дорожньої конструкції і потрібних транспортно-експлуатаційних показників автомобільної дороги є актуальним в усіх країнах світу й особливо в Україні на сучасному етапі, враховуючи, що повітряний транспорт не функціонує і більшість перевезень виконується автомобільним транспортом.

Проблематика. Сучасна експлуатація автомобільних доріг потребує підвищеної уваги до процесів вологоперенесення у ґрунтах основи дорожнього одягу, адже від цього безпосередньо залежать його міцнісні та деформативні характеристики. Проникнення атмосферних опадів у товщу дорожньої конструкції призводить до зміни вологості й щільності ґрунту, що впливає на його несну здатність.

Ґрунтова основа є ключовим елементом дорожнього одягу, який виконує роль фундаменту всієї конструкції. Будь-які зміни її фізико-механічного стану, викликані зволоженням або перезволоженням, накопичуються впродовж стоку експлуатації автомобільної дороги та проявляються у вигляді тріщин, руйнувань шарів дорожнього оядгу, колійності тощо.

Мета. Дослідити на реальній конструкції дорожнього одягу вплив вологості ґрунту його основи на його міцнісні і деформативні показники. Також виконати моделювання зміни цих показників від зміни виду ґрунту основи і його вологості.

Висновки. Аналіз наукових публікацій, присвячених тематиці дослідження, виконаних лабораторних досліджень, числових розрахунків і математичного моделювання свідчить, що однією із

умов гарантованої міцності дорожнього одягу, є забезпечення достатньої міцності його ґрунтової основи. Що досягається забезпеченням твердого стану ґрунтів, як під час будівництва (для супіщаних ґрунтів розрахункову вологість рекомендується приймати небільше ніж 60 % від вологості на межі текучості, для глинистих – 55 %), так і під час експлуатування автомобільної дороги.

Ключові слова: автомобільна дорога, активне напруження, водно-тепловий режим, вологість, ґрунт, дорожній одяг, земляне полотно, модуль пружності, показник, робочий шар, фізико-механічні властивості.

Вступ. На сучасному етапі в дорожній галузі України виконують тільки роботи з експлуатаційного утримання автомобільних доріг. З часом стан доріг погіршується і забезпечення міцності конструкції дорожнього одягу завжди залишається актуальним питанням, як під час проєктування і нового будівництва доріг, так і під час їхнього ремонтування та експлуатування.

В Україні близько 99 % автомобільних доріг мають нежорсткий дорожній одяг, тобто конструкція якого містить шари, міцність яких залежить від температури, вологості та часу дії навантаги [1].

Саме вологість ґрунтів робочого шару земляного полотна, які є основою для шарів дорожнього одягу, є одним із чинників від якого залежать фізико-механічні властивості ґрунту і відповідно загальний модуль пружності конструкції дорожнього одягу та її споживчі властивості.

Одним із основних джерел потрапляння вологи у дорожній одяг є опади, особливо для автомобільних доріг, які проходять в насипах. Дощова вода потрапляє в конструкцію через тріщини, узбіччя, дренажні канали або високе залягання ґрунтових вод. Вода проникає вглиб під дією гравітації, капілярних сил, осмотичного тиску та різниці температур і тисків.

Виклад основного матеріалу. Питанню впливу вологості ґрунтів на міцність дорожньої конструкції та зміни цієї вологості, зокрема від дії атмосферних опадів присвячено багато робіт як в Україні, так і за кордоном. Зокрема у Швеції з цього питання було виконано масштабне дослідження [2] з використанням пересувної установки Heavy Vehicle Simulator (HVS-Nordic), результати дослідження показали, що вологість здатна істотно змінювати стійкість незв'язаних зернистих матеріалів до залишкових деформацій і утворення колії.

Проникність дорожніх матеріалів зазвичай зростає вниз від поверхні покриття до глибини близько 0,7 м. За оцінками авторів [3], близько 80 % проблем у дорожніх конструкціях пов'язані з наявністю води. Якщо вода накопичується на слабопроникному шарі, верхні шари залишаються вологими, а їх замерзання спричиняє руйнування. Негативний вплив вологи і зниження несної здатості та довговічності, зокрема асфальтобетонного покриву розглянутий в роботах [4, 5].

Charlie та інші [6] змоделювали реакцію дорожнього одягу за різного вмісту вологи й показали, що збільшення вологості з 2,3 % до 4,8 % підвищує деформації приблизно на 60 %. Chen та інші [7] встановили, що модуль пружності основи знижується приблизно на 30 % при кожному підвищенні вологості на 1 %.

Salour і Erlingsson [8] зібрали дані, які показали чіткий зв'язок між вологістю та жорсткістю незв'язаних шарів. Зворотний розрахунок даних FWD (Falling Weight Deflectometer) показав зниження жорсткості ґрунтів основи на 63 % і зернистого шару на 48 % у період весняного відтавання порівняно з літніми значеннями. Було зафіксовано різке збільшення прогинів у цей період: максимальні значення зросли у 4,7 рази від повністю мерзлого стану до відталого шару основи.

Rahman M.M. та інші [9] також з використанням зворотного розрахунок даних FWD в польових умовах, а також тривісного стиснення ґрунтів в лабораторних умовах отримали залежності модуля пружності від CBR для різної вологості ґрунту основи і її впливу на колієутворення.

У роботі [10] автори виконали дослідження, як зміна температури та вологості впливають на несну здатність конструкції дорожнього одягу. Одними із результатів стали такі висновки: найбільший вплив на структурну міцність дорожнього одягу мали: несна здатність ґрунту основи, його чутливість до гідротермічного впливу, товщина асфальтобетонних шарів і загальна товщина дорожнього одягу. Вплив незв'язаних шарів був незначний. Також було отримано, що сезонний вплив на міцність дорожнього одягу через зміну несної здатності ґрунту основи зберігався навіть після корекції

жорсткості асфальтобетонних шарів залежно від температури шару. Було встановлено, що більша жорсткість асфальтобетонних шарів восени та навесні була недостатньою, щоб компенсувати зменшення міцності дорожнього одягу через зниження несної здатності ґрунту.

В Україні тематиці водно-теплового режиму дорожньої конструкції, впливу вологи від різних джерел зволоження на стан земляного полотна і дорожню конструкцію, у середині двадцятого століття, присвячено фундаментальні праці Сіденка В.М., в останні роки цьому питанню також приділялось багато уваги, зокрема в роботах фахівців ДП «ДерждорНДІ» (нині «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ») [11-15], Харківського національного автомобільно-дорожнього університету [16] та науковців Національного транспортного університету [17-21]. Причому багато робіт направлені на регулювання водно-теплового режиму земляного полотна з використанням дренажів мілкого закладання [22-26]. В останніх дослідженнях [27, 28] розроблено метод визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів, який відображає дифузійний рух води і є однією із основних характеристик під час розрахунку водно-теплового режиму земляного полотна та встановлення вологості ґрунтів.

Тобто питання регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції, зокрема вологості ґрунтів основи дорожнього одягу залишається актуальним і потребує подальшого удосконалення.

Метою цього дослідження є оцінювання впливу вологості ґрунтів основи дорожнього одягу на його несуну здатність. Для досліджень було взято дані ДП «НІРІ» з польового обстеження конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі загального користування державного значення Н-25 Городище – Рівне – Старокостянтинів, які виконували для надання рекомендацій щодо забезпечення належних умов експлуатування одного із комплексів зважування в русі. З метою оцінювання стану і несної здатності природної основи та встановлення причин наявних деформацій дорожнього одягу були проведені інженерно-геологічні вишукування на основі удосконаленої методики динамічного зондування ґрунтів, відбирання кернів із покриву і шарів дорожнього одягу, геофізичне дослідження дорожньої конструкції на ділянці (рис. 1).

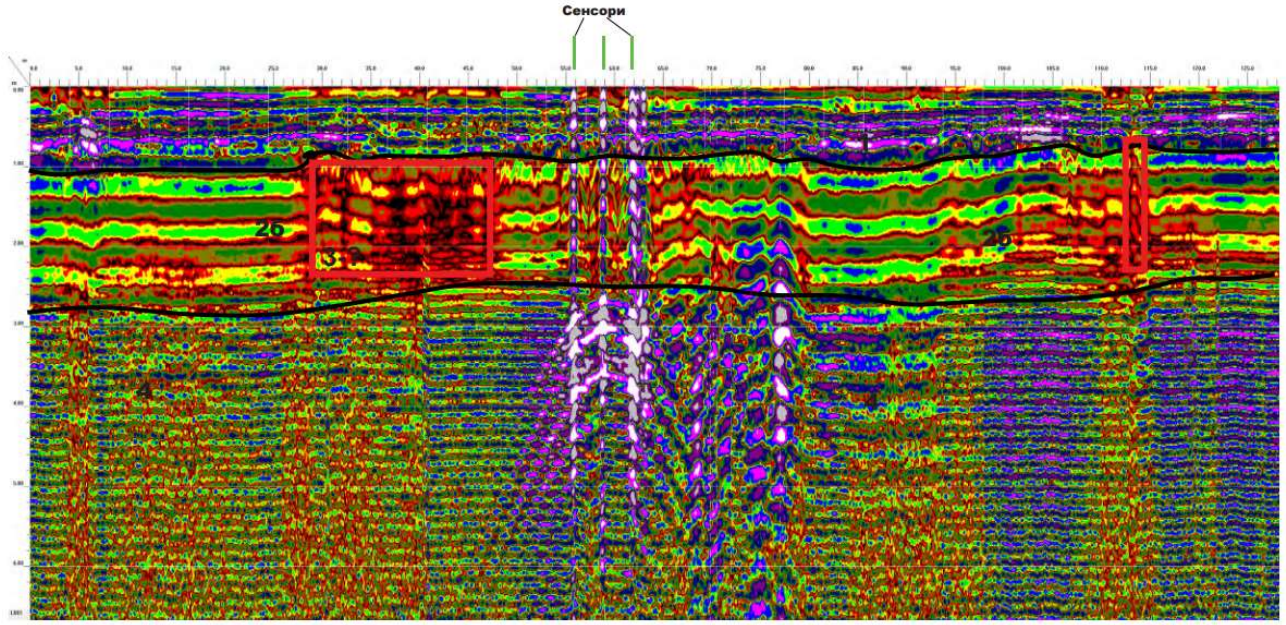
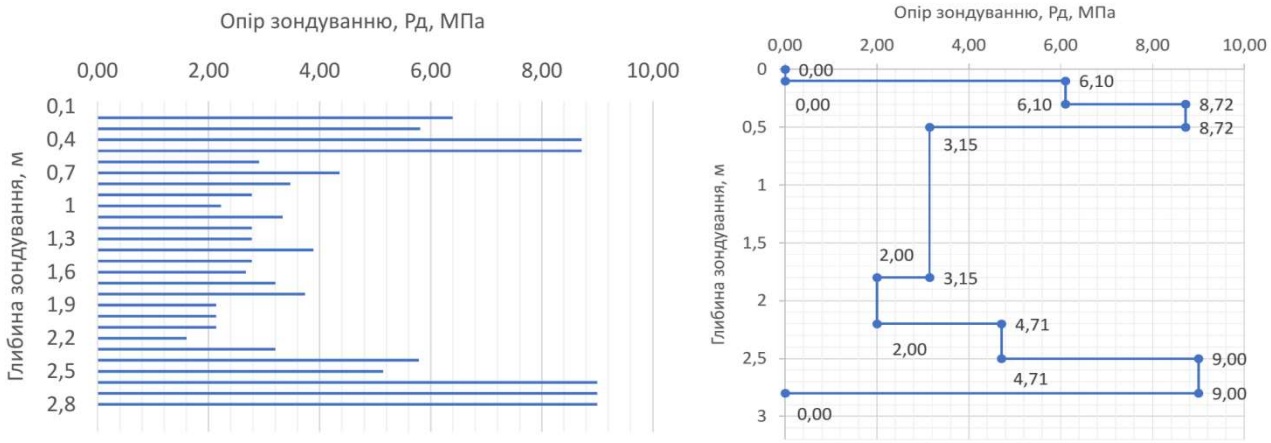


Рисунок 1 – Геофізичний профіль ґрунтової основи та земляного полотна, на ділянці дослідження

Figure 1 – Geophysical profile of the soil base and subgrade at the study site

Графіки опору ґрунту зондуванню зображені на рис. 2.



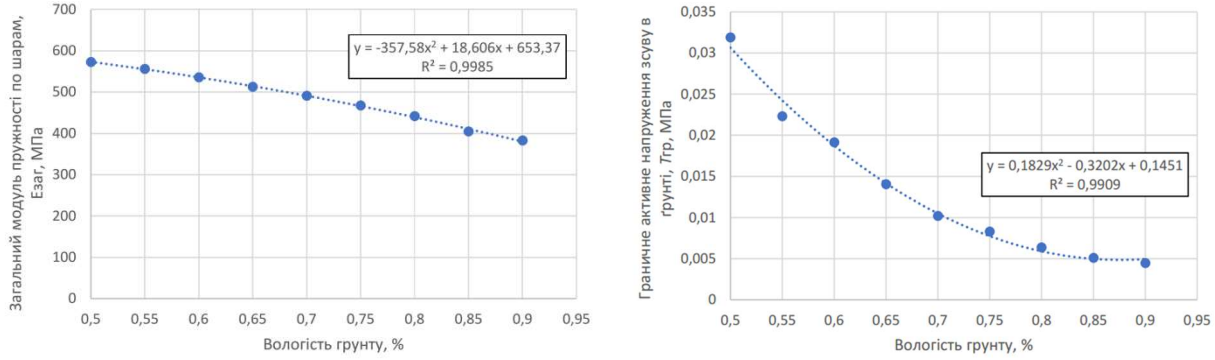
а) б)

Рисунок 2 – Стовпчиковий (а) і поінтервальний (б) графіки зміни умовного опору зондуванню, МПа за глибиною
Figure 2 – Columnar (a) and interval (b) graphs of changes in the conditional resistance to probing, MPa by depth

За результатами дослідження встановлено наявність зон із перезволоженим ґрунтом (рис. 1) та, відповідно до рис. 2, що ґрунт земляного полотна на глибині (1,80 – 2,20) м має опір зондуванню 2,00 МПа (перезволожений суглинок пилуватий), що могло бути однією із причин виникнення деформацій на цій ділянці дороги.

Категорія автомобільної дороги на цій ділянці – II, конструкція дорожнього одягу: щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53 товщиною 5,0 см; асфальтополімербетон щільний на бітумі БМПА 60/90-53 на основі термоеластопластів Тип А – 6,0 см; матеріал за технологією холодного ресайклінгу без додавання мінеральних матеріалів, укріплений цементом М40 – 16,0 см; щебенево-піщана суміш, укріплена цементом М40 – 15,0 см; щебенево-піщана суміш С5 – 21,0 см; ПГС згідно з ДСТУ Б В.2.7-30 – 15,0 см; суглинок важкий пилуватий.

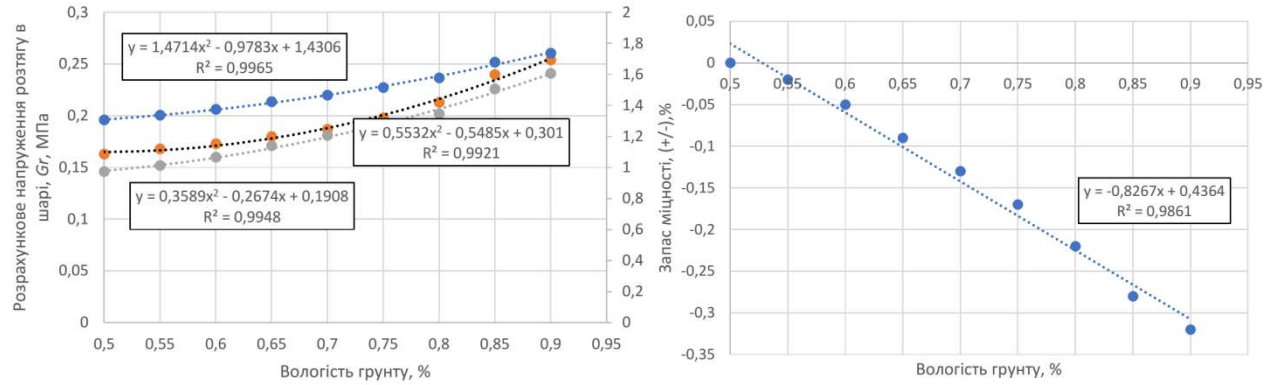
Міцнісні і деформаційні показники зазначеної вище конструкції дорожнього одягу від зміни вологості ґрунту основи наведені на рис. 3.



а) б)

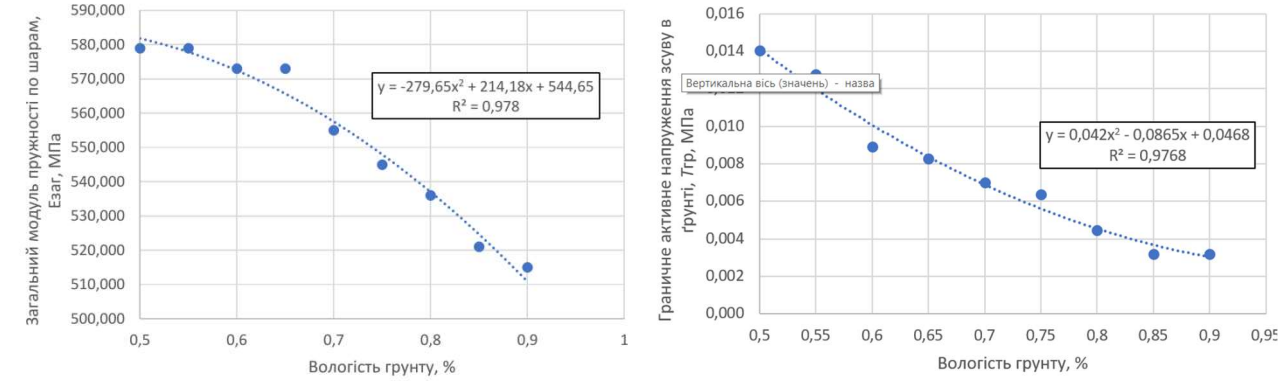
Рисунок 3 – Залежність показників конструкції дорожнього одягу від вологості ґрунту основи (суглинок важкий пилуватий): а) загальний модуль пружності дорожнього одягу; б) граничне активне напруження зсуву в ґрунті; в) розрахункові напруження розтягу у зв'язних шарах (для синього графіка (шар асфальтобетону) шкала справа); г) запас міцності конструкції дорожнього одягу

Figure 3 – Dependence of road pavement design parameters on subgrade soil moisture content (heavy silty loam): a) total modulus of elasticity of road pavement; b) ultimate active shear stress in soil; c) calculated tensile stress in cohesive layers (for the blue graph (asphalt concrete layer), see the scale on the right); d) safety factor of road pavement structure

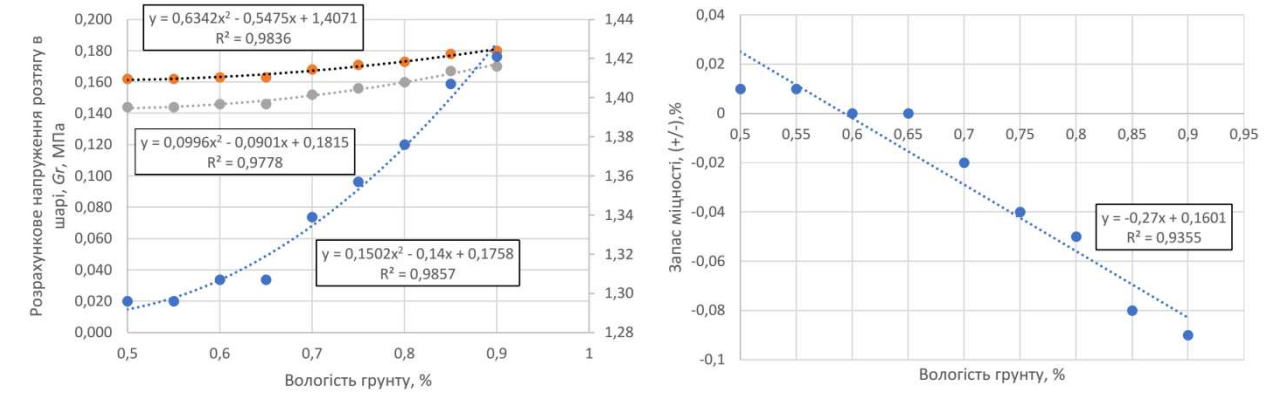


в) г)

Рисунок 3 (продовження)
Figure 3 (continued)



а) б)



в) г)

Рисунок 4 – Залежність показників конструкції дорожнього одягу від вологості ґрунту основи (супісок пилуватий): а) загальний модуль пружності дорожнього одягу; б) граничне активне напруження зсуву в ґрунті; в) розрахункові напруження розтягу у зв'язних шарах (для синього графіка (шар асфальтобетону) шкала справа); г) запас міцності конструкції дорожнього одягу

Figure 4 – Dependence of road pavement design parameters on subgrade soil moisture content (silty sandy loam): a) total modulus of elasticity of road pavement; b) ultimate active shear stress in soil; c) calculated tensile stress in cohesive layers (for the blue graph (asphalt concrete layer), see the scale on the right); d) safety factor of road pavement structure

Для порівняння, для цієї ж конструкції дорожнього одягу було виконано розрахунки для інших, поширених на території України, видів ґрунтів (глина піщаниста, суглинок легкий пилуватий, супісок пилуватий, супісок легкий, пісок дрібнозернистий пилуватий). Зокрема для супіску пилуватого результати наведені на рис. 4.

Аналіз результатів математичного моделювання показує, якщо ґрунт знаходиться в твердому стані, незалежно від виду ґрунту, міцнісні і деформаційні показники конструкції дорожнього одягу змінюються не значно.

Наприклад, для дослідної ділянки ґрунт суглинок важкий пилуватий (вологість на межі текучості 38 %, вологість на межі розкочування 20 %), за зміни вологості з 19 % до 20,5 % (тобто ґрунт із твердого стану перейшов на межу напівтвердого) загальний модуль пружності дорожньої конструкції майже не змінюється з 573 МПа до 556 МПа (у межах похибки вимірювання) див. рис. 3, те ж стосується і розрахункових напружень розтягу у зв'язних шарах конструкції, але суттєво знизилось граничне активне напруження зсуву в шарі ґрунту – майже на 43 % та запас міцності конструкції (рис. 3). Стан значно погіршується, якщо ґрунт переходить у м'якопластичний стан, зокрема за збільшення вологості даного суглинку до 30,8 % загальний модуль пружності дорожньої конструкції зменшується майже на 30 %, розрахункові напруження розтягу у зв'язних шарах конструкції зростають для різних шарів від 20 % до 50 %, граничне активне напруження зсуву в шарі ґрунту зменшилось у 4 рази, а запас міцності конструкції впав до – 22 %.

Ця ж тенденція прослідковується і для інших видів глинистих ґрунтів, тільки для ґрунтів із більшим числом пластичності усі показники значно погіршуються, із зменшенням числа пластичності, тобто для супісків, дорожня конструкція стає менш чутливою до зміни вологості в межах твердого – м'якопластичного стану із середнім показником пластичності 0,6.

Отримані дані корелюють і підтверджують тезу Литвиненка А.С. [11, 12], який на комплексному аналізі великого діапазону зв'язних ґрунтів за числом пластичності, отриманому як у лабораторних умовах, так на дорожніх об'єктах, рекомендує щоб вологість ґрунтів в основі дорожнього одягу, навіть за додаткового зволоження в процесі експлуатації, не перевищувала вологості, яка відповідає твердому стану зв'язних ґрунтів за показником текучості.

Таблиця 1 – Рекомендовані розрахункові значення показників деформативності і міцності ґрунтів для розрахунку жорстких і нежорстких дорожніх одягів

Table 1 – Recommended calculated values of soil deformability and strength indicators for calculating rigid and non-rigid road pavements

Вид ґрунту за числом пластичності, I_P	Конструктивний елемент	Показники міцності і деформативності	Показник текучості, I_L	Показник відносної ущільненості, K_d
				$1{,}1 > K_d > 1{,}0$
$I_P < 12$	Робочий шар	E, МПа φ, град c, кПа	$-0{,}75 \le I_L < -0{,}25$	≥ 100 ≥ 30 ≥ 35
	Інша частина земляного полотна	E, МПа φ, град c, кПа	$-0{,}25 \le I_L < 0$	≥ 85 ≥ 25 ≥ 22
$I_P \ge 12$	Робочий шар	E, МПа φ, град c, кПа	$-0{,}15 \le I_L < -0{,}05$	≥ 140 ≥ 22 ≥ 70
	Інша частина земляного полотна	E, МПа φ, град c, кПа	$-0{,}05 \le I_L < 0$	≥ 120 ≥ 18 ≥ 40

Орієнтовний вигляд таблиці розрахункових значень показників деформативності і міцності ґрунтів для розрахунку жорстких і нежорстких дорожніх одягів згідно з [12] наведений у табл. 1.

У табл. 1 число пластичності, показники текучості й ущільненості розраховуємо за відомими формулами:

$$I_P = W_L - W_p,$$

$$I_L = (W - W_p) / I_P, \quad (1)$$

$$K_d = (e_{WL} - e) / (e_{WL} - e_{W\text{р}}),$$

де I_P – число пластичності;

W_L – вологість на межі текучості;

W_p – вологість на межі розкочування;

I_L – показник текучості;

K_d – показник відносної ущільненості;

e, e_{WL}, $e_{W\text{р}}$ – коефіцієнт пористості ґрунту і за вологостей на межі текучості і розкочування відповідно.

Висновок. Забезпечення якісних споживчих властивостей автомобільної дороги завжди залишається актуальною вимогою суспільства. Одним із елементів, який безпосередньо впливає на безпеку, швидкість і комфортність дорожнього руху є дорожній одяг. Стан його покриву та міцність конструкції забезпечують зазначені вище властивості.

Аналіз літературних джерел, результатів виконаних лабораторних досліджень, числових розрахунків і математичного моделювання свідчить, що однією із умов гарантованої міцності дорожнього одягу, є забезпечення достатньої міцності його ґрунтової основи. У розвиток цього потрібно, з одного боку забезпечити щільність ґрунту під час спорудження земляного полотна із розрахунковою вологістю, яка менша рівна вологості на межі розкочування щоб забезпечити твердий стан ґрунту, $I_L < 0$, з іншого – вжиття всіх заходів на всіх етапах життєвого циклу дороги для мінімізації чи унеможливлення перезволоження ґрунтів основи дорожнього одягу, зокрема вологою від інфільтрації опадів.

Твердий стан зв’язних ґрунтів забезпечує достатні значення показників механічної міцності і деформативності ґрунтів для забезпечення як загальної міцності і стійкості насипного ґрунту, так і розташованої на ньому дорожньої конструкції. При чому для супіщаних ґрунтів їхню розрахункову вологість рекомендується приймати небільше ніж 60 % від вологості на межі текучості, тобто $W_{\text{роз}} \leq 0{,}6\ W_L$, для глинистих – 55 %.

Перелік посилань

1. ДСТУ 9214:2023 Автомобільні дороги. Терміни та визначення понять. Київ, 2023. 47 с. (Інформація та документація).

2. Wiman L.G. Accelerated Load Testing of Pavements: HVS-NORDIC Tests at VTI Sweden 2003–2004.VTI Rapport 544A. 2006. Available online: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670625/FULLTEXT01.pdf (останній час звернення 20.05.2025).

3. Birgisson B., Ruth B. Improving performance through consideration of terrain conditions: Soils, drainage,and climate. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*. 2003, 1819, 369–377. https://doi.org/10.3141/1819b-47.

4. Charlier R., Hornych P., Sršen M., Hermansson Å., Bjarnason G., Erlingsson S., Pavši˘c P. Water influence on bearing capacity and pavement performance: Field observations. In *Water in Road Structures.* Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009. P. 175–192. (Scopus)

https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_8

5. Dawson A., Kringos N., Scarpas T., Pavšič P. Water in the pavement surfacing. In *Water in Road Structures*. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009. P. 81–105. (Scopus)
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_5

6. Charlier R., Laloui L., Brenčič M., Erlingsson S., Hansson K., Hornych P. Modelling coupled mechanics, moisture and heat in pavement structures. In *Water in Road Structures*; Springer: Dordrecht, The Netherlands. 2009. P. 243–282. (Scopus)
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_11

7. Chen D.H., Sun R., Yao Z. Impacts of aggregate base on roadway pavement performances. *Constr. Build. Mater.* 2013. 48. 1017–1026. (Scopus)
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.101

8. Salour F., Erlingson S. Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer. *Road Mater. Pavement Des.* 2013. 14. 141–158. (Scopus)
https://doi.org/10.1080/14680629.2012.754600

9. Rahman M.M., Gassman S.L., Islam K.M. Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences.* 2023. 13. 103. (Scopus)
https://doi.org/10.3390/geosciences13040103

10. Vaitkus A., Žalimiene L., Židanaviciute J., Žilioniene D. Influence of Temperature and Moisture Content on the Variation of Bearing Capacity of Pavements. *Materials.* 2019. 12. 3826. (Scopus)
https://doi.org/10.3390/ma12233826

11. Литвиненко А.С. Про фізичний зміст необхідної і достатньої величини густини сухого ґрунту зв'язних ґрунтів при спорудженні земляного полотна автомобільних доріг. *Автошляховик України.* 2011. № 4 (222). С. 21–27.

12. Литвиненко А.С. Про необхідність відмови від визначення розрахункових показників міцності і деформативності зв'язних ґрунтів відповідно до їх вологості на границі текучості. *Автошляховик України.* 2013. № 1 (231). С. 43–46.

13. Литвиненко А.С. Про вплив стану ґрунтових основ на стан дорожніх одягів на ділянках автомобільних доріг у нульових відмітках і невисоких насипах. *Автошляховик України.* 2014. № 6 (242). С. 35–39.

14. Kaskiv V., Havryshchuk V. Mathematical model for the duration of runoff formation determined from the road surface. *Heliyon.* Volume 6, ISSUE 12, E05687, December 01, 2020 (Scopus)
https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05687

15. Каськів В. І., Касай К. І. Аналіз підходів щодо оцінювання просочування опадів у ґрунт узбіччя автомобільних доріг. *Дороги і мости*. 2024. Вип. 30. С. 253–263.
https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.253

16. Процюк В. О. Прогнозування несучої здатності дорожніх одягів на ділянках з надмірним зволоженням ґрунтів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2013. Вип. 89. С. 24–32.

17. Бубела А. В. Дослідження закономірностей зволоження дорожньої конструкції та методи його регулювання. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2019. Вип. 105. С. 44–48.

18. Славінська О. С., Бубела А. В., Бондаренко Л. П., Чечуга О. С. Прогнозування режиму водовідведення з дорожньої конструкції. *Автошляховик України*. 2020. Вип. 3. С. 28–36.
https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-3-263-28-36

19. Петрович В. В. Касай К. І. Дослідження характеристик опадів для розрахунків поверхневого водовідведення й інфільтрації вологи в ґрунт земляного полотна автомобільних доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*». 2024. Вип. 115. Частина 2. С. 137–146.
https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-137-146

20. Савенко В. Я., Каськів В. І. Вплив опадів на розподіл вологості ґрунтів верхньої частини земляного полотна. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1997. Вип. 54. С.6–11.

21. Каськів В. І. Удосконалення показників робочої зони високих насипів з врахуванням інфільтрації атмосферних опадів : дис... канд. техн. наук : 05.22.11. К., 1998. 286 с.

22. Стьожка В. В. Удосконалення методу розрахунку дренажних систем мілкого закладення : дис... канд. техн. наук : спец. 05.22.11. К., 2015. 219 с.

23. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No 7 (106). P. 62-75. (Scopus) https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421

24. Slavinska O., Bubela A., Chechuha O., Bondarenko L. The intensity of water removal from shallow drainage systems considering the properties of filler materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 3. 1 (105). (Scopus) https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203551

25. Бубела А. В. Методологія проектування поперечних дренажів мілкого закладання з оцінкою якісного стану автомобільної дороги : дис... д-р техн. Наук : спец. 05.22.11. К., 2021. 427 с.

26. Славінська О. С., Бубела А. В., Онищенко А. М., Усиченко О. Ю., Стьожка В. В. Удосконалення методу розрахунку параметрів поперечного дренажу мілкого закладання на автомобільних дорогах. *Вісник Національного транспортного університету.* Серія «Технічні науки». 2022. Вип. 1 (51). С. 352–362. https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-352-362

27. Бондаренко Л. П., Кватадзе Є. І. Методи визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів земляного полотна. *Дороги і мости*. 2022. Вип. 26. С. 138–146. https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.138

28. Bubela, A., Bondarenko, L., Kvatadze, Y., Stozhka, V., Ivko, A. (2024). Devising a method for determining themoisture conductivity coefficient of subgrade soils taking into account European approaches and standards. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (131)), 80–89. (Scopus) https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.314117

STUDY OF THE INFLUENCE OF SUBGRADE SOIL MOISTURE ON THE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF PAVEMENT STRUCTURE

Petrovych Volodymyr V., Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. OmelyanovichaPavlenka, 1, room 138, https://orcid.org/0000-0003-0422-2535

Kasai Kostiantyn I., National Transport University, postgraduate student, e-mail: kasai2709@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-3292-3339

Summary. The article examines how the moisture content of the pavement subgrade affects the strength and deformation performance of the overall pavement structure.

Relevance. In Ukraine, about 99 % of public roads have flexible pavement, whose layers exhibit strength properties that vary with temperature, moisture, and duration of applied loads. Moisture in the subgrade soil is therefore a critical factor governing structural reliability and long-term serviceability. Ensuring that a road pavement can sustain required traffic and service conditions is a pressing task worldwide and particularly urgent in Ukraine, where, under current circumstances, air transport does not function as an alternative.

Problem Statement. Modern highway operation calls for close attention to water migration processes in the pavement subgrade, since the subgrade's strength and deformation response depend directly on its moisture regime. Infiltration of precipitation into the pavement body changes soil moisture and density, which in turn affects bearing capacity.

The soil subgrade serves as the foundation for the entire pavement system. Any alterations in its physical and mechanical condition caused by wetting or prolonged oversaturation accumulate over years of service and manifest as cracking, layer disintegration, rutting, and other forms of structural distress.

Objective. The study aims to quantify, on a full-scale pavement section, the influence of subgrade soil moisture on strength and deformation parameters, and to model how these parameters vary depending on soil type and moisture content.

Conclusions. A review of scientific publications, together with laboratory tests, numerical calculations, and mathematical modeling, shows that maintaining adequate strength of the subgrade is a prerequisite for durable pavement performance. This can be achieved by ensuring the soil remains in a sufficiently firm state both during construction and throughout service life. For example, for sandy loam the design moisture content should not exceed about 60 % of the liquid-limit moisture, and for clayey soils about 55 %.

Keywords: highway, active stress, water-thermal regime, moisture, soil, pavement, embankment, modulus of elasticity, indicator, working layer, physical and mechanical properties.

References

1. DSTU 9214:2023 Motorways. Terms and definitions. Kyiv, 2023. 47 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

2. Wiman L.G. Accelerated Load Testing of Pavements: HVS-NORDIC Tests at VTI Sweden 2003–2004.VTI Rapport 544A. 2006. Available online: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670625/FULLTEXT01.pdf (last accessed on 20.05.2025).

3. Birgisson B., Ruth B. Improving performance through consideration of terrain conditions: Soils, drainage,and climate. Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board 2003, 1819, 369–377. https://doi.org/10.3141/1819b-47.

4. Charlier R., Hornych P., Sršen M., Hermansson Å., Bjarnason G., Erlingsson S., Pavšič P. Water influence on bearing capacity and pavement performance: Field observations. In *Water in Road Structures.* Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009. P. 175–192. (Scopus)
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_8

5. Dawson A., Kringos N., Scarpas T., Pavšič P. Water in the pavement surfacing. In *Water in Road Structures*. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009. P. 81–105. (Scopus)
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_5

6. Charlier R., Laloui L., Brenčičc M., Erlingsson S., Hansson K., Hornych P. Modelling coupled mechanics, moisture and heat in pavement structures. In *Water in Road Structures*; Springer: Dordrecht, The Netherlands. 2009. P. 243–282. (Scopus)
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_11

7. Chen D.H., Sun R., Yao Z. Impacts of aggregate base on roadway pavement performances. *Constr. Build. Mater.* 2013. 48. 1017–1026. (Scopus)
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.101

8. Salour F., Erlingson S. Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer. *Road Mater. Pavement Des.* 2013. 14. 141–158. (Scopus) https://doi.org/10.1080/14680629.2012.754600

9. Rahman M.M., Gassman S.L., Islam K.M. Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences.* 2023. 13. 103. (Scopus)
https://doi.org/10.3390/geosciences13040103

10. Vaitkus A., Žalimiene L., Židanaviciute J., Žilioniene D. Influence of Temperature and Moisture Content on the Variation of Bearing Capacity of Pavements. *Materials.* 2019. 12. 3826. (Scopus)
https://doi.org/10.3390/ma12233826

11. Litvinenko, A.S. On the physical meaning of the necessary and sufficient density of dry cohesive soils in the construction of road subgrades. *Avtoshlyakhovik Ukrainy*. 2011. No. 4 (222). P. 21–27 [in Ukrainian].

12. Litvinenko A.S. On the need to abandon the determination of the calculated strength and deformability of cohesive soils according to their moisture content at the yield point. *Avtoshlyakhovik Ukrainy*. 2013. No. 1 (231). P. 43–46 [in Ukrainian].

13. Litvinenko A.S. On the influence of the condition of soil foundations on the condition of road pavements on sections of motorways at zero elevations and low embankments. *Avtoshlyakhovyk Ukrainy*. 2014. No. 6 (242). P. 35–39 [in Ukrainian].

14. Kaskiv V., Havryshchuk V. Mathematical model for the duration of runoff formation determined from the road surface. *Heliyon*. Volume 6, ISSUE 12, E05687, December 01, 2020 (Scopus) https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05687

15. Kaskiw V. I., Kasai K. I. Analysis of approaches to assessing precipitation infiltration into the soil of road shoulders. Roads and Bridges. 2024. Issue 30. P. 253–263 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.253

16. Protsyuk V. O. Forecasting the bearing capacity of road pavements in areas with excessive soil moisture. Motorways and Road Construction. 2013. Issue 89. P. 24–32 [in Ukrainian].

17. Bubela A. V. Research on the patterns of road structure moisture and methods of its regulation. Motorways and Road Construction: Scientific and Technical Collection. 2019. Issue 105. P. 44–48 [in Ukrainian].

18. Slavinska O. S., Bubela A. V., Bondarenko L. P., Chechuga O. S. Forecasting the drainage regime from road structures. Avtoshlyakhovyk Ukrainy. 2020. Issue 3. P. 28–36 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-3-263-28-36

19. Petrovich V. V., Kasai K. I. Research on precipitation characteristics for calculating surface drainage and moisture infiltration into the subgrade of motorways. Motorways and Road Construction. 2024. Issue 115. Part 2. P. 137–146 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-137-146

20. Savenko V. Ya., Kaskiv V. I. The influence of precipitation on the distribution of soil moisture in the upper part of the roadbed. Motorways and Road Construction. 1997. Issue 54. P. 6–11 [in Ukrainian].

21. Kaskiw V. I. Improvement of the performance of the working area of high embankments taking into account the infiltration of atmospheric precipitation: dissertation... Candidate of Technical Sciences: 05.22.11. Kyiv, 1998. 286 p. [in Ukrainian].

22. Stizhka V. V. Improvement of the method for calculating shallow drainage systems: dissertation... Candidate of Technical Sciences: specialty 05.22.11. Kyiv, 2015. 219 p. [in Ukrainian].

23. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No 7 (106). P. 62-75. (Scopus) https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421

24. Slavinska O., Bubela A., Chechuha O., Bondarenko L. The intensity of water removal from shallow drainage systems considering the properties of filler materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 3. 1 (105). (Scopus) https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203551

25. Bubela, A. V. Methodology for designing shallow cross drains with assessment of the quality of motorways: dissertation... Doctor of Technical Sciences: specialty 05.22.11. Kyiv, 2021. 427 p. [in Ukrainian].

26. Slavinska O. S., Bubela A. V., Onishchenko A. M., Usichenko O. Yu., Stiozka V. V. Improvement of the method for calculating the parameters of shallow cross drainage on motorways. *Bulletin of the National Transport University*. Series “Technical Sciences.” 2022. Issue 1 (51). P. 352–362 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-352-362

27. Bondarenko L. P., Kvatadze E. I. Methods for determining the moisture conductivity coefficient of subgrade soils. *Roads and Bridges*. 2022. Issue 26. Pp. 138–146 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.138

28. Bubela, A., Bondarenko, L., Kvatadze, Y., Stozhka, V., Ivko, A. (2024). Devising a method for determining themoisture conductivity coefficient of subgrade soils taking into account European approaches and standards. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (131)), 80–89. (Scopus) https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.314117

УДК 624.21
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-137-146

ОЦІНКА УМОВ РОБОТИ МУЛИСТИХ ҐРУНТІВ В ОСНОВІ ТА УКОСАХ ЗЕМЛЯНИХ СПОРУД

RESEARCH AND ANALYSIS OF ENGINEERING ANTI–LANDSLIDE MEASURES APPLIED DURING THE CONSTRUCTION OF AUTOMOBILE ROADS ON FOREST LANDS



Петрович Володимир Володимирович, *аспірант кафедри дорожньо–будівельних матеріалів і хімії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e–mail: e–mail: menor@ukr.net, тел.+380930932262*

https://orcid.org/0009–0002–1513–2789



Петрович Ігор Володимирович, *аспірант кафедри системного проєктування об'єктів транспортної інфраструктури та геодезії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e–mail: igor19932008@gmail.com, тел.+380663837188*

https://orcid.org/0009–0008–3551–3718



Савенко Сергій Сергійович, *аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e–mail: sava0304@gmail.com, тел.+380639570047.*

https://orcid.org/0009–0007–2243–3471



Чечуга Євген Сергійович*, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e–mail: Cecugazena2@gmail.com, тел.+3800937533521*

https://orcid.org/0009–0008–6799–4843



Юрчук Віталій Васильович, *аспірант кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e–mail: urcukvitalij6@ukr.net, тел.+380966611626*

https://orcid.org/0009–0008–8596–5296

Анотація. В статті проведений аналіз загального положення оцінки умов роботи мулистих ґрунтів. Розглянуто умови переходу мулистих і піщаних ґрунтів у догранічний та позамежний за міцністю стан під дією додаткових навантажень від земляних споруд. Проаналізовано похибки розрахунків при використанні різних коефіцієнтів міцності та визначено їх межі для ґрунтів із різними кутами внутрішнього тертя. Наведено умови виникнення деформацій повзучості та можливості їх розвитку у слабких прошарках. Запропоновано застосування аналітичних залежностей для визначення швидкості осідання стисливих шарів, що має практичне значення для оцінки роботи основ земляних споруд та укосів.

Ключові слова: ґрунт, деформація, зсув, мулистий ґрунт, міцність, навантаження, напруження, насип, осідання, оцінка, пластичність, позамежний стан, стійкість, тиск, умови роботи.

Вступ. Розглядаючи питання про умови роботи мулистих ґрунтів в основі споруд – високих земляних насипів необхідно виділити три самостійні питання.

Перше полягає в оцінці можливого переходу ґрунтів основи в позаграничний за міцністю стан, при їх додатковому завантажені вагою насипу, що споруджується.

Другий спрямований на виявлення зон можливого розвитку деформацій повзучості, та оцінку значущості цього фактору для розглянутих споруд.

Третє питання стосується можливого відтискування мулистого ґрунту під дією навантаження, що створюється на поверхні цього мулистого шару шаром, який розміщений вище або спорудою, що споруджується.

Незважаючи на зовнішню відмінність цих питань, ці питання загалом взаємопов'язані та мають загальну якісну основу. Разом з тим для простоти аналізу кожне з цих питань будемо розглядати окремо.

Оцінка міцності мулистих ґрунтів. Загальна ідея оцінки міцності ґрунтів, прийнята нами, полягає у визначенні коефіцієнта

$$K_\tau = {S_{pw}}/{\tau_{max}}. \quad (1)$$

Таким чином догранічному стану відповідають значення $K_\tau > 1$. Граничному $K_\tau = 1$ та позамежному $K_\tau < 1$.

Оцінку міцності по $K_\tau = {S_{pw}}/{\tau_{max}}$ виявляється достатньо справедливою для ґрунтів, у яких кут внутрішнього тертя має малу величину. Мулисті ґрунти в більшості своєму мають кут внутрішнього тертя $\varphi_w < 5^\circ$, що дозволяє прийняти зазначену вище форму оцінки міцності. Разом з тим при розрахунку опірності мулу зрушенню ми враховуватимемо діючі по площині τ_w повні нормальні напруги $P_n = \frac{P_1+P_2}{2} = \frac{P_x+P_y}{2}$; тоді матимемо:

$$K_\tau = \frac{P_n \cdot tg\varphi_w + c_w}{\tau_{max}}, \quad (2)$$

Для більшої переконливості допустимості такого спрощення проведемо невеликий аналіз можливої помилки. Так, строго кажучи, оцінку міцності ґрунтів, що володіють тертям $(\varphi_w \neq 0)$, слід вести по куту найбільше відхилення θ_{max}. Умови міцності тоді пов'язують із співвідношенням θ_{max} і φ_w, при $\theta_{max} > \varphi_w$ має позамежний стан, а при $\theta_{max} < \varphi_w$ забезпечену міцність. Тоді:

$$K_\theta = \frac{S_{pw}}{\tau_\theta} = \frac{P_\theta \cdot tg\varphi_w + c_w}{\tau_\theta}. \quad (3)$$

Якщо порівняти K_τ і K_θ, будемо мати $N = {K_\theta}/{K_\tau}$:

$$N=\frac{(P_\theta \cdot tg\varphi_w+c_w)\cdot\tau_{max}}{(P_\tau \cdot tg\varphi_w+c_w)\tau_\theta}. \quad (4)$$

Врахувавши, що $\tau_\theta=\tau_{max}\cdot\cos\theta_{max}$ будемо матимемо:

$$N=\frac{(P_\theta \cdot tg\varphi_w+c_w)\cdot\tau_{max}}{(P_\tau \cdot tg\varphi_w+c_w)\cos\theta_{max}}. \quad (5)$$

Найбільше значення N залежно від (4) ми отримаємо, якщо приймемо в аналізі $c_w = 0$. Тоді:

$$N=\frac{[(P_1+P_2)-(P_1-P_2)\sin\theta_{max}]\cdot tg\varphi_w}{(P_1+P_2)tg\varphi_w\cdot\cos\theta_{max}}=\frac{1}{\cos\theta_{max}}\left(\frac{(P_1+P_2)}{(P_1+P_2)}-\frac{(P_1-P_2)}{(P_1+P_2)}\right)\cdot\cos\theta_{max}=$$
$$=\frac{1}{\cos\theta_{max}}\left(1\text{-}sin^2\,\theta_{max}\right)=\cos\theta_{max}. \quad (6)$$

Очевидно, що при кутах θ_{max} до 18° ($\cos\theta_{max}$=0,95) точність рішення не виходить за межі 5%, а якщо врахувати, що кут внутрішнього тертя мулів до 5°, то помилка не буде більше 0,5% при використанні K_τ замість K_θ.

Проведений аналіз корисний ще й з тієї точки зору, що показує, що для піщаних ґрунтів з $\varphi_w \approx 20\div25^0$ оцінку міцності проводити за $\frac{1}{K_\tau}=\frac{\tau_{max}}{S_{pw}}=\frac{\tau_{max}}{P_n\cdot tg\varphi_w}$, і у даному випадку помилка не буде перевищувати для $\varphi_w \approx 20^0$-6%, а для $= \varphi_w \approx 25^0$-10%.

Виявлення зон розвитку розвитку деформацій повзучості. Відповідно до критеріїв повзучості, висловлених Н.Н. Масловим, деформації повзучості матимуть місце в ґрунті в тому випадку, якщо діючі в ньому дотичні напруги τ виявляться більше деякого порогового значення τ_{lim} відбиває міцнісні властивості ґрунту і дорівнює:

$$\tau_{lim}=p\cdot tg\varphi_w+c_c, \quad (7)$$

де c_c – властиве даному ґрунту структурне зчеплення.

Дослідження, проведені лабораторією UAM з виявлення параметрів повзучості, були засновані на базі, розробленій проф, М.М.Масловим, фізико–технічної теорії повзучості. На основі цієї теорії критерій можливості прояву деформації повзучості глинистого ґрунту в покраденому вигляді може бути поданий як:

$$\tau_{lim} < \tau < S_{pw}, \quad (8)$$

де τ_{lim} – межа повзучості;

τ – дотична напруга, що діє в ґрунті в даній точці та площадці;

S_{pw} – опір ґрунту зсуву.

Основним питанням в оцінці реологічних властивостей глинистого ґрунту є встановлення властивого йому "порога повзучості" (τ_{lim}), і навіть коефіцієнта в'язкості (η) ґрунту, необхідних для визначення інтенсивності деформації повзучості.

Визначення величини "порога повзучості" (τ_{lim}) велися кількома шляхами:

– у першому випадку, за аналітичним виразом (9) із використанням залежностей $\varphi_w = f(w)$ та $c_w = f(w)$, а також результатів дослідів "плашка по плашці";

$$\tau_{lim}=p\cdot tg\varphi_w+c_c, \quad . \quad (9)$$

– у другому випадку визначення τ_{lim} виконувалося за даними випробувань з постійною швидкістю деформації зсуву (v = const = $8{,}3 \cdot 10^{-10}$ см/сек);

– у третьому випадку були виконані досліди з визначення τ_{lim} за величиною рівноважної дотичної напруги τ, відповідає граничному стану зразка за швидкістю деформації зміщення. Досліди щодо встановлення рівноважного значення дотичної напруги, що відповідає τ_{lim}, проводилися на апараті прямого зсуву з похилим столиком. Значення межі повзучості" τ_{lim} визначали як:

$$\tau_{lim} = p \cdot \mathrm{tg}\alpha_{\mathrm{kp}} \qquad (10)$$

де p – величина нормального навантаження на зразок;

α_{kp} – критичний кут нахилу столика зсувного приладу, при якому починала проявлятися деформація повзучості ґрунту;

– в четвертому випадку величину "порога повзучості" визначали за даними дослідів на тривалий зсув, в результаті побудови графіка залежності відносної швидкості від дотичних напруг $v = f(\tau)$, рис. 1. Отримана залежність носить лінійний характері і служить графічного визначення величини "порога повзучості " відповідного v=0.

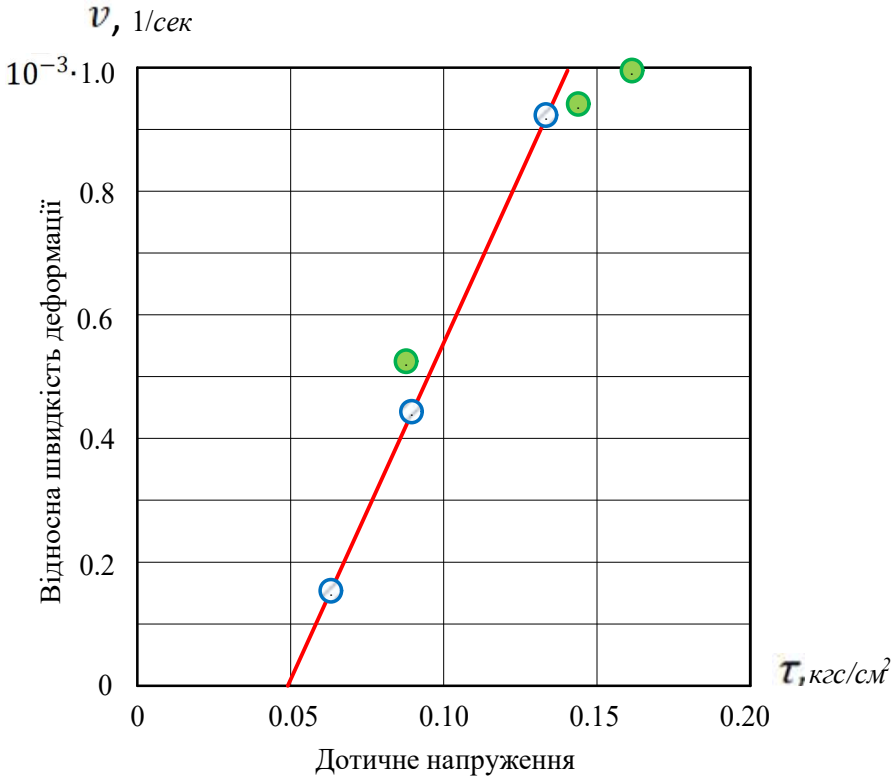


Рисунок 1 – Залежність відносної швидкості деформації зсуву від напруги.
Figure 1 – Dependence of relative shear strain rate on stress.

Як зазначалося вище величина τ_{lim} може бути визначена різними методами, але найпростіший і надійніший це за висловом наведеним вище (9).

І так, повзучість буде в тих зонах, де $\tau_{max}>\tau_{lim}$.

Разом з тим є і друга умова для деформації повзучості $\tau_{max}<S_{pw}$, що відбиває умови знаходження ґрунту в догранічному за міцністю стану, тобто $S_{pw}>\tau_{max}>\tau_{lim}$.

Очевидно, що за умовою повзучість розвиватиметься у зонах догранічного стану та в реальних умовах може контактувати з цими зонами.

Оцінка можливості віддавлювання мулистого ґрунту. Це завдання виникає у зв'язку з ймовірністю видавлювання слабкого пластичного ґрунту з простору між жорсткішими шарами подібно до крему, який видавлюється з шаруватого пирога, коли його починають різати.

З відтисканням ґрунтів із–під країв насипів, зведених на слабких болотистих або мулистих ґрунтах, досить часто стикаються дорожники.

Свого часу проф. Л.К. Юргенсон виходячи з умови ступеня розвитку в цьому слабкому шарі пластичних деформацій з відтисканням з нього матеріалу вивів формулу для визначення навантаження p_o (умовно рівномірнорозподільну), при якій виникає цей процес:

$$p_o=\frac{1}{H}C\cdot b\ , \tag{11}$$

де H – потужність слабкого шару,

b – половина ширини насипу,

C – зчеплення в ґрунті (при куті $\varphi_w\rightarrow 0$).

Рішення Л.К. Юргенсона виведено для умов, коли деформація охоплює весь шар, тобто у кожній точці $\tau_{max}=c$. Для віддавлювання всього шару Юргенсоном отримано закон фактичного розподілу нормального тиску по поверхні слабкого шару:

$$\sigma=2C\ (b-x)/H. \tag{12}$$

Загальне навантаження необхідне для початку віддавлювання:

$$p=\frac{2Cb^2}{H}. \tag{13}$$

Особливістю рішення Л.К. Юргенсона є те, що в ньому, по–перше, відсутнє врахування швидкості деформації при різних значеннях p і друге, у рішення введено граничне значення P, з якого починається процес віддавлювання. Це (друге) випливає з умови $\tau_{max}\geq c$ (тільки тоді буде віддавлювання, а це у свою чергу висуває „C" як деяке граничне значення. З теорії та практики відомо, що сили тертя ґрунту ($p\cdot tg\varphi_w$) і структурне зчеплення (C_c) є факторами, що гальмують розвиток пластичних деформацій. Натомість сили зв'язності $\sum_w$ допускають такі деформації. Тоді в рішенні Юргенсона „C" може бути прийнято рівним "порога повзучості" за М.М. Масловим ($\tau_{lim}=p\cdot tg\varphi_w+C_c$). Очевидно, що для ґрунтів не мающих τ_{lim} , таких як пластичні глини та деякі види мулів, деформації віддавлювання можуть починатися при найменших значеннях p , але швидкість цього віддавлювання може виявитися дуже маленькою, і з нею в деяких випадках можна знехтувати.

Зазначимо, що у розрахунках, де враховувалась міцність мулистих ґрунтів ми часом використовували і кут внутрішнього тертя φ_w ($\approx$ 3°), тому в (5) якості „C" ми підставляли τ_{lim}.

Розробляючи більш детально питання віддавлювання мулистого ґрунту ми скористалися основними рішеннями, які наводить А.Надай.

Розрахункова схема представлена на рис. 2.

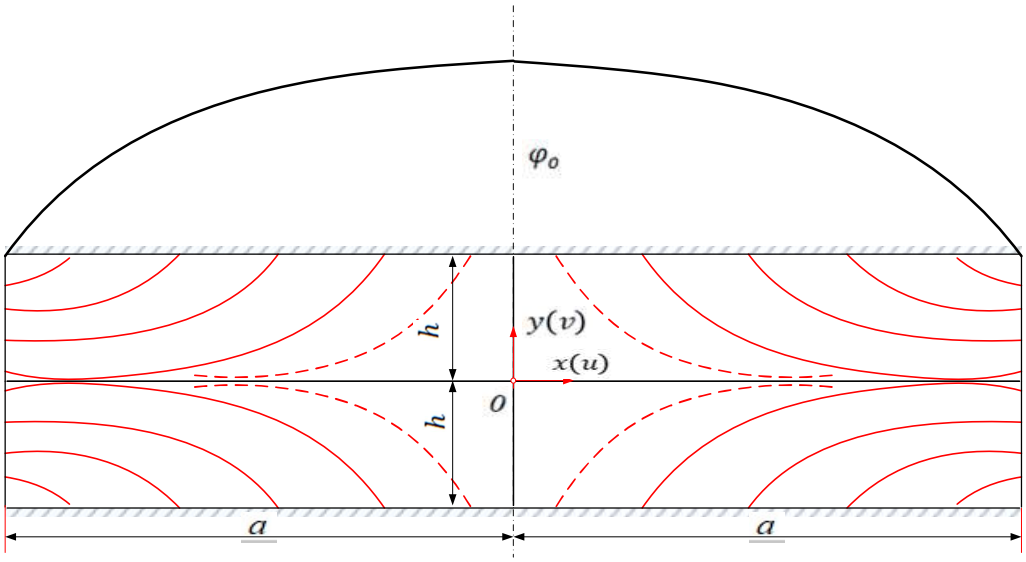


Рисунок 2 – Схема для розрахунку віддавлювання пластичного ґрунту (за А. Надаї).
Figure 2 – Scheme for calculating the pressure drop of plastic soil (according to A. Nadai).

Шар пластичного матеріалу потужністю $2\,h_o$, шириною $2a$ і довжиною $2b$ стискається між паралельними пластинами. Оскільки довжини b дуже велика ($b\to\infty$), то віддавлювання ґрунту в напрямку b немає. Віддавлювання йде тільки в напрямку a по вісі x . При вирішенні прийнято умови:

1) матеріал не стискаємо, тобто об'ємних деформацій немає;

2) на контакті з пластинами матеріал не прослизає, тобто при:

$$y = h \quad u = o \quad v = -v_o = const;$$
$$y = -h \quad u = o \quad v = v_o = const, \tag{14}$$

де u і v – швидкості по осі x і y відповідно.

Відповідно до першої умови можна записати (для умов плоскої задачі) $a_o \cdot h_o = a_i \cdot h_i$, де нульові індекси відповідають початковим умовам, а в i проміжних при t_i.

У в'язкій речовині поле швидкостей u і v при плоскій деформації визначається бігармонічною функцією ψ.

У стані плоскої течії $v = -\frac{d\psi}{dx}$; $u = \frac{d\psi}{dy}$; функція струму ψ задовольняє вказівним умовам $y = h \rightarrow \psi = v_o \cdot x$, $y = -h \rightarrow \psi = v_o \cdot x$, $\frac{d\psi}{dy} = 0$ (на контакті з пластинкою немає струму).

Для даного випадку бігармонічну функцію ψ можна записати у вигляді

$$\psi = \frac{\tau_0 x}{2h^3} \cdot (3h^2 y - y^3). \tag{15}$$

Тоді для швидкостей u і v отримаємо такі вирази

$$u = \frac{3\tau_0 x}{2h}\left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right), \quad v = \frac{v_0}{2}\left(\frac{3y}{h} - \frac{y^3}{h^3}\right). \tag{16}$$

Можна бачити, що u розподілена параболі. Середня напруження σ чи тиск $p = -\sigma$ можна обчислити за їх градієнтами з використанням рівнянь:

$$\begin{gathered}\eta \cdot \Delta u + \frac{d\sigma}{dx} = 0; \\ \eta \cdot \Delta v + \frac{d\sigma}{dy} = 0; \\ \Delta\gamma = 0.\end{gathered} \tag{17}$$

Тоді

$$\begin{gathered}\frac{dp}{dx} = \eta \cdot \Delta u = -\frac{3\eta \cdot v_0 . x}{h^3}; \\ \frac{dp}{dx} = \eta \cdot \Delta v = \frac{3\eta \cdot v_0 . y}{h^3}; \\ p = p_0 + \frac{3\eta \cdot v_0}{2h^3}(y^2 - x^2),\end{gathered} \tag{18}$$

де p_0 – тиск на початку координат $y = x = 0$.

Тиск p_0 одержують за останнім виразом з (18) умови $p=0$ при $x = \pm a$, $y = 0$, що відповідає умові рівності нулю тиску $p=0$ при $y = 0$ (по осі шару) та на межі шару ($x = \pm a$).

Тоді

$$\begin{gathered}p_0 = \frac{3\eta \cdot v_0 \cdot a^2}{2h^3}; \\ p = \frac{p_0}{a}(a^2 + y^2 - x^2).\end{gathered} \tag{19}$$

Компоненти напруги σ_x, σ_y, τ_{xy}можна знайти із рівнянь:

$$\begin{gathered}\sigma_x = p \cdot 2\eta \cdot \dot{\varepsilon}_x = \frac{p_o}{a^2}(x^2 - 3y^2 - a^2 - 2h^2); \\ \sigma_y = p \cdot 2\eta \cdot \dot{\varepsilon}_y = \frac{p_o}{a^2}(x^2 + y^2 - a^2 - 2h^2); \\ \tau_{xy} = \eta \cdot \dot{\gamma}_{xy} = \frac{2\, p_o \cdot x \cdot y}{a^2}.\end{gathered} \tag{20}$$

У (18) і (20) η – коефіцієнт в'язкості, $\dot{\varepsilon}_x$ і $\dot{\varepsilon}_y$ і $\dot{\gamma}_{xy}$ – швидкості деформації.

Рівняння (20) дають значення напружень, які виникають у точках видавлюваного шару за умови паралельного зближення пластин. Очевидно, що при $y = 0$, тобто по осі шару вздовж осі $\sigma_x = \sigma_y = -p$. Епюра $\sigma_x = \sigma_y = -p$ має параболічний обрис з максимальним значенням на початку координат, тобто в середині шару($x = y = 0$).

Повне результуюче навантаження за площею $2b \; x \; 2a$ для осьової площини шару ($y = 0$) приблизно дорівнює

$$p = 4b\int_0^a (p)_{y=0} dx = \frac{2}{3} p_0 \cdot 4 \cdot a \cdot b = \frac{8}{3} a \cdot b \cdot \frac{3\eta \cdot v_0 \cdot a^2}{2h^3} = \frac{4\eta \cdot v_0 \cdot a^3 b}{h^3}; \tag{21}$$

Отриманий вираз (21) зручно використовувати для розрахунку швидкості v_o:

$$v_o = \frac{p \cdot h^3}{2\eta \cdot a^3 \cdot b}. \quad (22)$$

Вираз (22) можна використовувати для розрахунку швидкості осідання верхнього шару (верхньої межі шару, що стискається), якщо в нашому розпорядженні буде загальний (сумарний) тиск по поверхні $2b \ x \ 2a$. Слід однак мати на увазі, що загальна швидкість буде фактично меншою, так як в міру віддавлювання ґрунту буде зменшуватися h, але цією зміною в більшості випадків можна знехтувати.

Практично маючи епюру напруг σ можна обчислити її площу в межах *a*, а далі прийнявши *b=1м* отримаємо погонне (по довжині *b*) сумарне навантаження. Підставивши це навантаження у вираз (22) отримаємо швидкість стиснення шарів розмірність (*см/сек*). Для зручності можна ввести коефіцієнт $3{,}15 \ x \ 10^7$ і тоді матимемо швидкість в (*см/рік*), що зручніше для аналізу результатів.

Висновки

При оцінці можливого переходу ґрунтів основи у позамежний за міцністю стан під час їх додаткового навантаження вагою насипу встановлено таке:

1. За кутів θ_{max} до 18° похибка розрахунків не перевищує 5%. Якщо ж врахувати, що кут внутрішнього тертя мулів зазвичай не перевищує 5°, то при використанні коефіцієнта K_τ замість K_θ помилка не перевищує 0,5%.
2. Отримані результати мають практичне значення і для піщаних ґрунтів $\varphi_w \approx 20 \div 25^0$. Похибка становитиме не більше ніж 6% при $\varphi_w \approx 20°$ та до 10% при $\varphi_w \approx 25°$.

Під час виявлення зон можливого розвитку деформацій повзучості важливо враховувати, що ця форма деформації виникає за умови $\tau_{max} < S_{pw}$, тобто коли ґрунт перебуває у догранічному за міцністю стані ($S_{pw} > \tau_{max} > \tau_{lim}$). Це свідчить про те, що повзучість розвивається саме у зонах, наближених до межі міцності, і в реальних умовах може поширюватися на суміжні ділянки.

Особливу увагу слід приділяти можливому відтискуванню слабких прошарків мулистого ґрунту під дією навантаження, створюваного вищележачими шарами або споруджуваною земляною конструкцією.

Формулу (22) можна використовувати для визначення швидкості осідання верхньої межі шару, що стискається, за умови, що відомий сумарний тиск на площі. При цьому фактична швидкість буде дещо меншою через поступове зменшення товщини шару h, однак у більшості практичних випадків цим впливом можна знехтувати.

Використовуючи наведені залежності (5)–(7), виконано оцінку умов роботи мулистих ґрунтів як в основі земляних споруд, так і в тілі укосу.

Перелік посилань

1. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти: Підручник / М. Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А. В. Яковлєв, О. О. Петраков, В. Б. Швець, О. В. Школа, С. В. Біда, Ю. Л. Винников. – Полтава: ПНТУ, 2003. – 446 с.

2. Основи та фундаменти. Навчальний посібник для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія / І.О.Парфентьєва, О.В. Верешко, Д.А. Гусачук Луцьк: ЛНТУ, 2017. – 296 с.

3. ДСТУ Б В.2.1–11:2009: Методи лабораторного визначення властивостей набухання та усадки. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 23 с.

4. ДСТУ Б В.2.1–23:2009 Ґрунти. Методи лабораторного визначення коефіцієнта фільтрації.

5. ДБН В.2.3–4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування . Частина ІІ Будівництво.

6. ДСТУ Б В.2.1–2–96 (ГОСТ 25100–95) Ґрунти. Класифікація.

7. ДБН В.1.1–25–2009. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення.

8. Юрчук В.В., Петрович В.В., Петрович І.В., Чечуга Є.С. Дослідження та аналіз інженерних протипросідних заходів, які застосовуються при будівництві автомобільних доріг на лесових ґрунтах//Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науковий журнал. Київ, 2024. Вип.115.1. С.302–308.

RESEARCH AND ANALYSIS OF ENGINEERING ANTI–LANDSLIDE MEASURES APPLIED DURING THE CONSTRUCTION OF AUTOMOBILE ROADS ON FOREST LANDS

Petrovych Volodymyr V., postgraduate student of the Road Construction Materials and Chemistry Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: menor@ukr.net, tel.+380930932262, https://orcid.org/0009-0002-1513-2789.

Petrovych Ihor V., postgraduate student of the System Design of Transport Infrastructure and Geodesy Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: igor19932008@gmail.com, tel.+380663837188, https://orcid.org/0009-0008-3551-3718.

Savenko Sergey S., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: sava0304@gmail.com, тел.+380639570047, https://orcid.org/0009–0007–2243–3471.

Chechuha Yevhen S., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: Cecugazena2@gmail.com, tel.+3800937533521, https://orcid.org/0009-0008-6799-4843.

Yurchuk Vitaly V., postgraduate student of the International Transportation and Customs Control Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: urcukvitalij6@gmail.com, tel.+380966611626, https://orcid.org/0009-0008-8596-5296.

Summary. The article examines the conditions under which silty and sandy soils transition to the ultimate and beyond-limit strength state under additional loading from earth structures. Errors in calculations using different strength coefficients are analyzed, and their limits for soils with varying internal friction angles are determined. The conditions for creep deformation and its potential development in weak soil layers are discussed. Analytical relationships for estimating the settlement rate of compressible layers are proposed, which have practical significance for assessing the performance of foundations and slopes of earth structures.

Keywords: soil, deformation, landslide, silty soil, strength, load, stress, embankment, settlement, assessment, plasticity, limit state, stability, pressure, operating conditions..

References

1. Engineering Geology. Soil Mechanics, Foundations and Foundations: Textbook / M. L. Zotsenko, V. I. Kovalenko, A. V. Yakovlev, O. O. Petrakov, V. B. Shvets, O. V. Shkola, S. V. Bida, Yu. L. Vinnikov. – Poltava: PNTU, 2003. – 446 p. [in Ukrainian]

2. Bases and foundations. Textbook for students majoring in 192 “Construction and Civil Engineering” / I.O. Parfentyeva, O.V. Vereshko, D.A. Gusachuk. – Lutsk: LNTU, 2017. – 296 p. [in Ukrainian]

3. DSTU B V.2.1–11:2009: Methods for laboratory determination of swelling and shrinkage properties. – Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2010. – 23 p. [in Ukrainian]

4. DSTU B V.2.1–23:2009 Soils. Methods for laboratory determination of filtration coefficient. [in Ukrainian]

5. DBN V.2.3–4:2015. Motorways. Part I. Design. Part II Construction. [in Ukrainian]

6. DSTU B V.2.1–2–96 (GOST 25100–95) Soils. Classification. [in Ukrainian]

7. DBN V.1.1–25–2009. Protection against hazardous geological processes, harmful operational influences, fire, engineering protection of territories and structures against flooding and inundation. [in Ukrainian]

8. Yurchuk V.V., Petrovich V.V., Petrovich I.V., Chechuga E.S. Research and analysis of engineering anti-subsidence measures used in the construction of motor roads on loess soils//Motor roads and road construction: scientific journal. Kyiv, 2024. Issue 115.1. P. 302–308. [in Ukrainian]

УДК 539.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-147-159**
UDK 539.3

ВПЛИВ ПОЛОЖЕННЯ ОСЬОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА НАПРУЖЕННО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЦЕМЕНТОБЕТОННОЇ ПЛИТИ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

INFLUENCE OF AXIAL LOAD POSITION ON THE STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE SLAB OF RIGID PAVEMENT



Онищенко Артур Миколайович, *доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд. Київ, Україна, e- mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com,*

https://orcid.org/0000-0002-1040-4530



Соловйов Ігор Леонідович, *кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, кафедра теоретичної та прикладної механіки. Київ, Україна, e-mail: i.soloviov@ntu.edu.ua*

https://orcid.org/0000-0001-5203-4139



Худолій Сергій Миколайович, *кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, кафедра вищої математики. Київ, Україна, e-mail: s_hoodoliy@i.ua*

https://orcid.org/0000-0001-6054-6708



Соловйов Віталій Ігорович, *магістрант, Національний транспортний університет, Київ, Україна e-mail: vitalikyou@ukr.net*

https://orcid.org/0009-0007-6543-6998

Анотація. Стаття присвячена аналізу напруженно-деформованого стану конструкції жорсткого дорожнього одягу влаштованого на багатошаровій основі в залежності від різних варіантів розташування осьового транспортного навантаження та конструктивних особливостей цементобетонного шару.

Враховуючи те, що на цементобетонне покриття автомобільної дороги діє складне просторове навантаження, доцільно використати числовий метод визначення напружено-деформованого стану покриття, що базується на розв'язанні рівнянь теорії пружності – методу скінченних елементів як найбільш універсального і ефективного. Його особливістю є безпосередній перехід від континуального об'єкту до дискретного аналізу шляхом ділення області об'єкту, який досліджується на ряд підобластей та апроксимації полів переміщень, зусиль, напружень, наприклад, з використанням інженерно-розрахункового комплексу. Розглянуто три варіанта розташування транспортного навантаження. В результаті виконаного числового моделювання проведено аналіз напружено-деформованого стану цементобетонного покриття з урахуванням різних розрахункових параметрів, що дозволяє встановити області концентрації напружень та прогнозувати характер руйнування цементобетонного покриття.

Ключові слова: автомобільна дорога, цементобетонне покриття, транспортні навантаження, поле напружень, напружено-деформований стан.

Вступ. У сучасному світі розвиток транспортної інфраструктури є ключовим чинником економічного зростання, ефективної логістики та мобільності населення. Проте останні роки характеризуються значним зростанням інтенсивності руху на автомобільних дорогах, що супроводжується не лише збільшенням загальної кількості транспортних засобів, а й підвищенням частки великовантажного транспорту — багатовісних автопоїздів, вантажівок з великою вантажопідйомністю. Ці фактори спричиняють передчасне утворення тріщин, колій, просідання та інших деформацій , що знижує експлуатаційний ресурс доріг. Вимушені і незаплановані ремонти призводять до погіршення умов проїзду та безпеки руху, утворенню заторів, значного зменшення фактичної пропускної здатності доріг, зменшенню продуктивності роботи автотранспорту. Частковим рішенням цієї проблеми може стати використання цементобетону для покриття автомобільних доріг. Цементобетон є набагато витривалішим до дії повторних навантажень, ніж асфальтобетон. Тому його застосовують на напружених маршрутах: підходах до морських портів, елеваторів, кар'єрів, аеропортів, митниць, стоянок великовагових транспортних засобів, логістичних центрів, об'їзних дорогах крупних населених пунктів, дорогах промислових підприємств, маршрутах руху контейнерів та зерновозів.

Постановка проблеми. Багаторічні спостереження за експлуатацією цементобетонних покриттів, а також аналіз зарубіжного досвіду дозволяє об'єктивно оцінити недоліки покриттів даного типу, головними з яких є тріщиноутворення в результаті дії: усадки, коливання температури добової та річної, перемінного заморожування – відтавання води в порах і ушкоджених місцях, динамічного навантаження від коліс транспортних засобів, руйнування кромок деформаційних швів цементобетонного покриття та його здиблення.

Як відомо, умови роботи цементобетонного покриття в різних його зонах (в центрі плити, по краях, торцях, кутах плити, полосі накату тощо) значно різняться. Це спричиняє можливість накопичення залишкових деформацій основи та часткового порушення контакту із основою, особливо це проявляється по краях та в зонах поперечних швів

В роботі [1] було проведено чисельне моделювання напружено деформованого стану конструкції жорсткого дорожнього одягу при положеннях транспортного навантаження у вигляді одиничного колеса запропонованих в [2] для розрахунку на міцність, а саме в центрі бетонної плити, посередині повздовжнього шва, посередині поперечного шва та в куті плити на перетині повздовжнього та поперечного швів. Дана робота присвячена дослідженню напружено-деформованого стану плити при русі осьового транспортного навантаження вздовж полоси накату.

Утворення тріщин в цементобетонному покритті порушують цілісність та монолітність дорожньої конструкції, розділяючи її на окремі блоки, не пов'язані між собою, кількість і протяжність утворених тріщин, що утворилися на покритті, майже не впливають на рух автомобілів до тих пір, поки не утворилися вибоїни та викришування, що призводить до погіршення рівності покриття, зниження рівня безпеки руху та створення аварійно – небезпечних ситуацій. Як наслідок, збільшуються витрати на утримання та ремонт цементобетонного покриття автомобільних доріг, які зазнають передчасних

руйнувань. У зв'язку з цим досить актуальною є проблема розробки більш точних математичних моделей деформування дорожніх одягів жорсткого типу в залежності від різного варіанту розташування навантаження та конструктивних особливостей плити.

Мета роботи. Мета роботи полягає в проведенні моделювання методом скінчених елементів напружено - деформованого стану цементобетонного покриття автомобільної дороги, яке влаштоване на багатошаровій основі і містить деформаційні шви між плитами, в залежності від різних варіантів розташування навантаження відносно деформаційних швів та конструктивних особливостей цементобетонного покриття таких як його модуль пружності та товщина.

Об'єктом дослідження є цементобетонне покриття автомобільних доріг**.**

Основна частина. Розглянемо конструкцію жорсткого дорожнього одягу що складається з бетонних плит на багатошаровій основі. Розмір плит вздовж напрямку руху транспорту складає 5 м та в поперечному напрямку 3 м. Між плитами влаштовані шви розширення, шви стиснення та повздовжні шви (Рис. 1.). Приймемо припущення що шви влаштовані на всю товщину плити та не укріплені штирями. Осьове транспортне навантаження моделюється двома відбитками коліс через які на плиту передається тиск. Товщини та механічні властивості шарів основи та бетонної плити наведено в таблиці 1. В чисельних розрахунках товщина бетонної плити *h* варіювалася від 18 см до 26 см з кроком 4 см. Модуль пружності *E* цементобетону мав значення 30000 МПа, 35000 МПа, 40000 МПа.

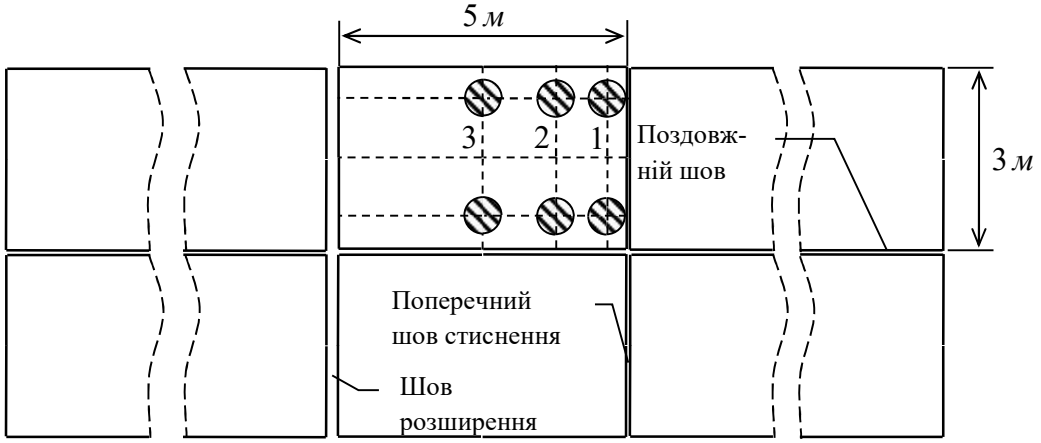


Рисунок 1 – Схема цементобетонного покриття
Figure 1 – Scheme of concrete coating

Таблиця 1 – Механічні властивості та товщини шарів конструкції жорсткого дорожнього одягу
Table 1 – Mechanical properties and thicknesses of the layers of the construction of hard road clothing

№	шар	h_i, см	Модуль пружності (Мпа)	Коефіцієнт Пуасона	Щильність кг/м^3
1	Важкий бетон класу В25 П3 F200 W6	18 -26	30000 - 40000	0,18	2800
2	Щебенево-піщана суміш С7	17,5	400	0,3	2000
3	Щебенево-піщана суміш С5	15	320	0,3	2000
4	Пісок середньої крупності	10	120	0,28	2000
5	Існуюче земляне полотно (супісок пилуватий)	80	48	0,3	2000

Виділимо для розгляду фрагмент конструкції дорожнього одягу, який містить одну плиту шириною 3 м та довжиною 5 м яка лежить на багатошаровій дорожній основі шириною 6 м та довжиною також 5 м (Рис. 2). Припустимо що колії розташовані на відстані 0,5 м від країв плити (що відповідає відстані між колесами автомобіля 2 м). Тоді виділений фрагмент конструкції має і геометричну симетрію і симетричне навантаження відносно вертикальної площини що проходить через вісь симетрії плити яка паралельна напрямку руху, отже можна розглянути модель половини виділенного фрагмента з умовами симетрії, що накладено на вузли які знаходяться в площині симетрії (Рис. 3).

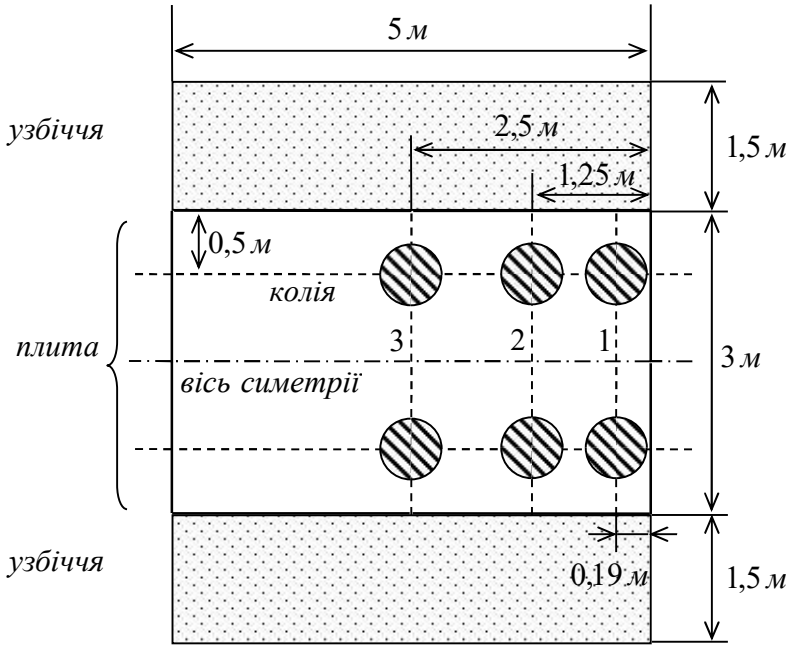


Рисунок 2 – Варіанти розташування транспортного навантаження на бетонній плиті
Figure 2 – Variants of transport load location on a concrete slab

Вважаємо, що транспортне навантаження на конструкцію – це тиск p, що передається від гумового колеса транспортного засобу на круглий відбиток діаметру D. В розрахунках приймалося що p = 1 МПа, D = 34,5 см. Крім транспортного навантаження на конструкцію діє гравітаційне навантаження від її власної ваги в вертикальному напрямку (вздовж осі Oz Рис. 3.). Вісь автомобіля поступово проходить положення 1, 2, 3 в напрямку руху що знаходяться на відстанях 0,19 м, 1,25 м, 2,5 м від краю плити відповідно.(Рис. 2).

Розглянемо три варіанти розташування статичного транспортного навантаження (Рис. 2):

Варіант №1 – відбиток колеса знаходиться на колії на відстані 0,19 м від краю плити;

Варіант №2 – відбиток колеса знаходиться на колії на відстані 1,25 м від краю плити;

Варіант №3 – відбиток колеса знаходиться на колії на відстані 2,5 м від краю плити;

Розглянемо скінчено-елементну модель даної конструкції. Осі Ox *(*паралельна напрямку руху*)* та Oy розташовані в горизонтальній площині (верхня грань бетонної плити), початок координат знаходиться в центрі плити, вісь Oz направлена вертикально вниз. Між плитою та основою влаштовано контакт з коефіцієнтом тертя 0,5 (Рис. 3). Щоб підкреслити наявність контактної взаємодії на цьому та подальших малюнках плита відокремлена умовним проміжком від багатошарової основи.

На найнижчу грань багатошарової основи що знаходиться в площині $z = \sum h_i$ накладено умову заборони переміщень. На вертикальні грані багатошарової основи накладено умові заборони преміщень у перпендикулярному до них напрямку та умови симерії на грань що відповідає площині симетрії. В роботі [3] було проведено дослідження впливу різних граничних умов при моделюванні конструкції дорожнього одягу і зроблено висновок про можливість використання таких граничних умов як деякого наближення до реальних граничних умов. На найвищу горизонтальну грань основи та на нижню горизонтальну грань плити накладено умови контакту. Всі інші грані бетонної плити вільні від обмежень.

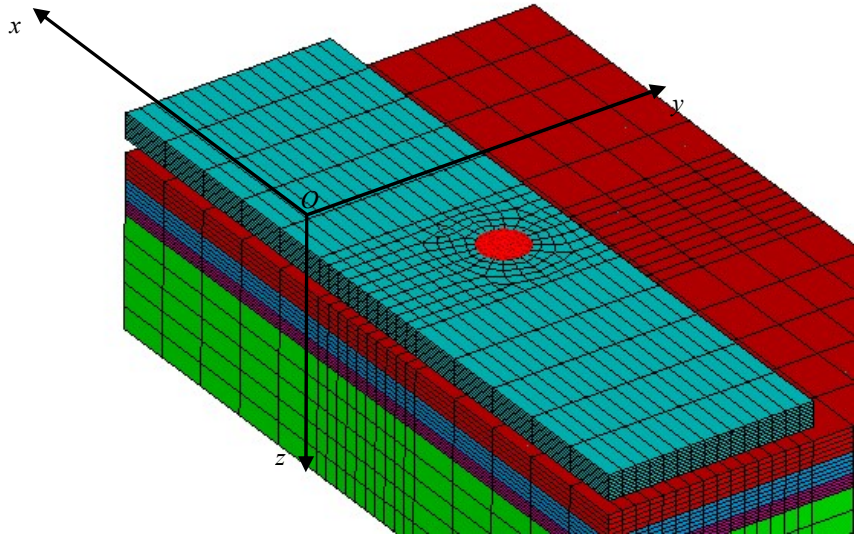


Рисунок 3 – Скінченоелементна модель половини виділеного фрагменту конструкції жорсткого дорожнього одягу

Figure 3 – Finite element model of half of the selected fragment of the rigid pavement structure

Результати розрахунків з варіюванням товщини плити та модуля її пружності проведених для варіантів навантаження 1-3 приведено в Таблицях 2-4 відповідно.

На рис. 4 - 6 показано поля повних переміщень у вузлах та напружень у елементах моделі для різних положень транспортного навантаження для випадку товщини плити h=18 см та модуля пружності бетону E=30000 МПа.

Таблиця 2 – Максимальні переміщення вузлів u_z, максимальні значення складових тензора напружень σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz} та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом σ_M в елементах скінченоелементної моделі конструкції жорсткого покриття для варіанту транспортного навантаження №1 при різних значеннях модуля пружності E та товщини бетонної плити h.

Table 2 – Maximum displacements of nodes u_z, maximum values of the components of the stress tensor σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz} and maximum equivalent Mises stresses σ_M in the elements of the finite element model of the rigid pavement structure for the transport load variant №1 at different values of the modulus of elasticity E and thickness of the concrete slab h.

Модуль пружності E, МПа	Товщина h, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченоелементної моделі										
		σ_x, МПа		σ_y, Мпа		σ_z, МПа		$\lvert\tau_{xy}\rvert$, МПа	$\lvert\tau_{yz}\rvert$, МПа	$\lvert\tau_{xz}\rvert$, МПа	σ_M, МПа	u_z, мм
		стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	max	max	max	max	max
30000	18	-1,28	1,31	-3,95	3,57	-1,15	0,115	0,835	1,03	0,92	3,85	1,42
	22	-1,12	1,15	-2,91	2,59	-1,14	0,092	0,636	0,828	0,706	2,73	1,34
	26	-0,97	1,01	-2,27	1,91	-1,13	0,075	0,518	0,682	0,676	2,12	1,27
35000	18	-1,38	1,41	-4,01	3,73	-1,16	0,118	0,855	1,05	0,933	3,39	1,4
	22	-1,19	1,22	-2,94	2,53	-1,14	0,092	0,649	0,841	0,707	2,76	1,31
	26	-1,07	1,1	-2,29	1,94	-1,13	0,075	0,526	0,69	0,403	2,13	1,25
40000	18	-1,47	1,49	-4,06	3,79	-1,15	0,12	0,871	1,07	0,946	3,96	1,38
	22	-1,26	1,29	-2,97	2,55	-1,14	0,092	0,66	0,852	0,707	2,78	1,29
	26	-1,15	1,18	-2,3	1,95	-1,13	0,075	0,534	0,697	0,676	2,14	1,23

Таблиця 3 – Максимальні переміщення вузлів u_z, максимальні значення складових тензора напружень σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz} та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом σ_M в елементах скінченоелементної моделі конструкції жорсткого покриття для варіанту транспортного навантаження №2 при різних значеннях модуля пружності E та товщини бетонної плити h.

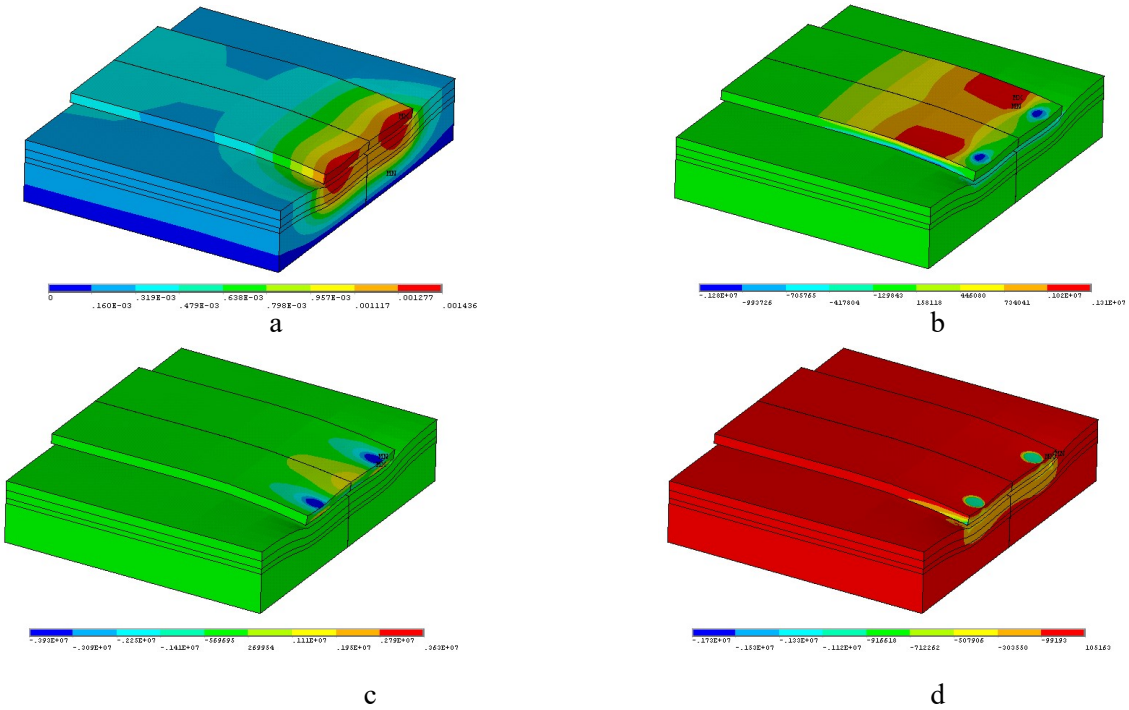
Table 3 – Maximum displacements of nodes u_z, maximum values of the components of the stress tensor σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz} and maximum equivalent Mises stresses σ_M in the elements of the finite element model of the rigid pavement structure for the transport load variant №2 at different values of the modulus of elasticity E and thickness of the concrete slab h.

Модуль пружності E, МПа	Товщина h, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченоелементної моделі										
		σ_x, МПа		σ_y, Мпа		σ_z, МПа		$\lvert\tau_{xy}\rvert$, МПа	$\lvert\tau_{yz}\rvert$, МПа	$\lvert\tau_{xz}\rvert$, МПа	σ_M, МПа	u_z, мм
		стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	max	max	max	max	max
30000	18	-3,34	3,13	-2,7	2,53	-1,18	0,055	0,449	0,189	0,197	2,96	0,75
	22	-2,51	2,35	-2,0	1,78	-1,15	0,055	0,320	0,184	0,184	2,19	0,72
	26	-2,13	1,82	-1,59	1,3	-1,13	0,055	0,254	0,183	0,177	1,68	0,7
35000	18	-3,44	3,24	-2,74	2,57	-1,18	0,055	0,457	0,190	0,200	3,04	0,74
	22	-2,58	2,43	-2,02	1,8	-1,15	0,051	0,324	0,184	0,185	2,24	0,70
	26	-2,18	1,87	-1,6	1,32	-1,13	0,055	0,256	0,183	0,178	1,71	0,69
40000	18	-3,53	3,34	-2,77	2,51	-1,18	0,055	0,463	0,190	0,202	3,11	0,73
	22	-2,73	2,49	-2,04	1,82	-1,15	0,051	0,328	0,184	0,186	2,29	0,7
	26	-2,22	1,91	-1,50	1,32	-1,13	0,055	0,258	0,183	0,179	1,74	0,68

Таблиця 4 – Максимальні переміщення вузлів u_z, максимальні значення складових тензора напружень σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz} та максимальні еквівалентні напруження за Мізесом σ_M в елементах скінченоелементної моделі конструкції жорсткого покриття для варіанту транспортного навантаження №3 при різних значеннях модуля пружності E та товщини бетонної плити h.

Table 4 – Maximum displacements of nodes u_z, maximum values of the components of the stress tensor σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz} and maximum equivalent Mises stresses σ_M in the elements of the finite element model of the rigid pavement structure for the transport load variant №3 at different values of the modulus of elasticity E and thickness of the concrete slab h.

Модуль пружності E, МПа	Товщина h, см	Максимальні значення складових тензора напружень в елементах скінченоелементної моделі										
		σ_x, МПа		σ_y, Мпа		σ_z, МПа		$\lvert\tau_{xy}\rvert$, МПа	$\lvert\tau_{yz}\rvert$, МПа	$\lvert\tau_{xz}\rvert$, МПа	σ_M, МПа	u_z, мм
		стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	стиск.	розтяг.	max	max	max	max	max
30000	18	-3,4	3,19	-2,71	2,53	-1,17	0,055	0,45	0,554	0,188	2,96	0,75
	22	-2,75	2,47	-2,0	1,78	-1,15	0,052	0,322	0,453	0,178	2,19	0,71
	26	-2,32	1,99	-1,59	1,3	-1,13	0,058	0,246	0,381	0,173	1,68	0,68
35000	18	-3,56	3,33	-2,73	2,57	-1,17	0,055	0,458	0,558	0,190	3,04	0,73
	22	-2,85	2,58	-2,02	1,8	-1,15	0,052	0,327	0,455	0,179	2,24	0,69
	26	-2,4	2,07	-1,6	1,32	-1,14	0,058	0,249	0,382	0,174	1,71	0,67
40000	18	-3,58	3,44	-2,76	2,5	-1,17	0,055	0,465	0,561	0,192	3,11	0,72
	22	-2,94	2,57	-2,04	1,82	-1,15	0,052	0,331	0,456	0,180	2,29	0,68
	26	-2,47	2,15	-1,51	1,33	-1,14	0,058	0,251	0,383	0,175	1,74	0,66



a b c d

Рисунок 4 – Поле повних переміщень вузлів моделі (a) та напружень σ_x (b), σ_y (c), σ_z (d) в елементах моделі для варіанту розміщення транспортного навантаження №1

Figure 4 – Distribution of total displacements of model nodes (a) and stresses σ_x (b), σ_y (c), σ_z (d) in model elements for transport load placement option №1

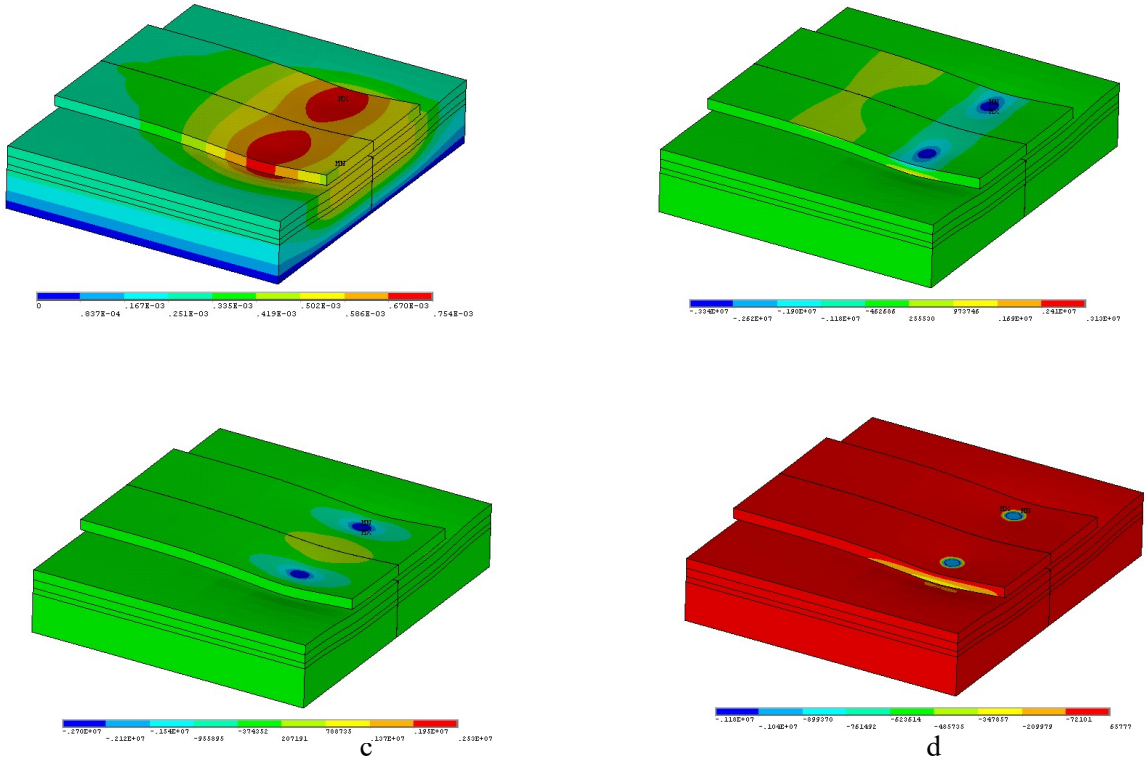


Рисунок 5 – Поле повних переміщень вузлів моделі (a) та напружень σ_x (b), σ_y (c), σ_z (d) в елементах моделі для варіанту розміщення транспортного навантаження №2

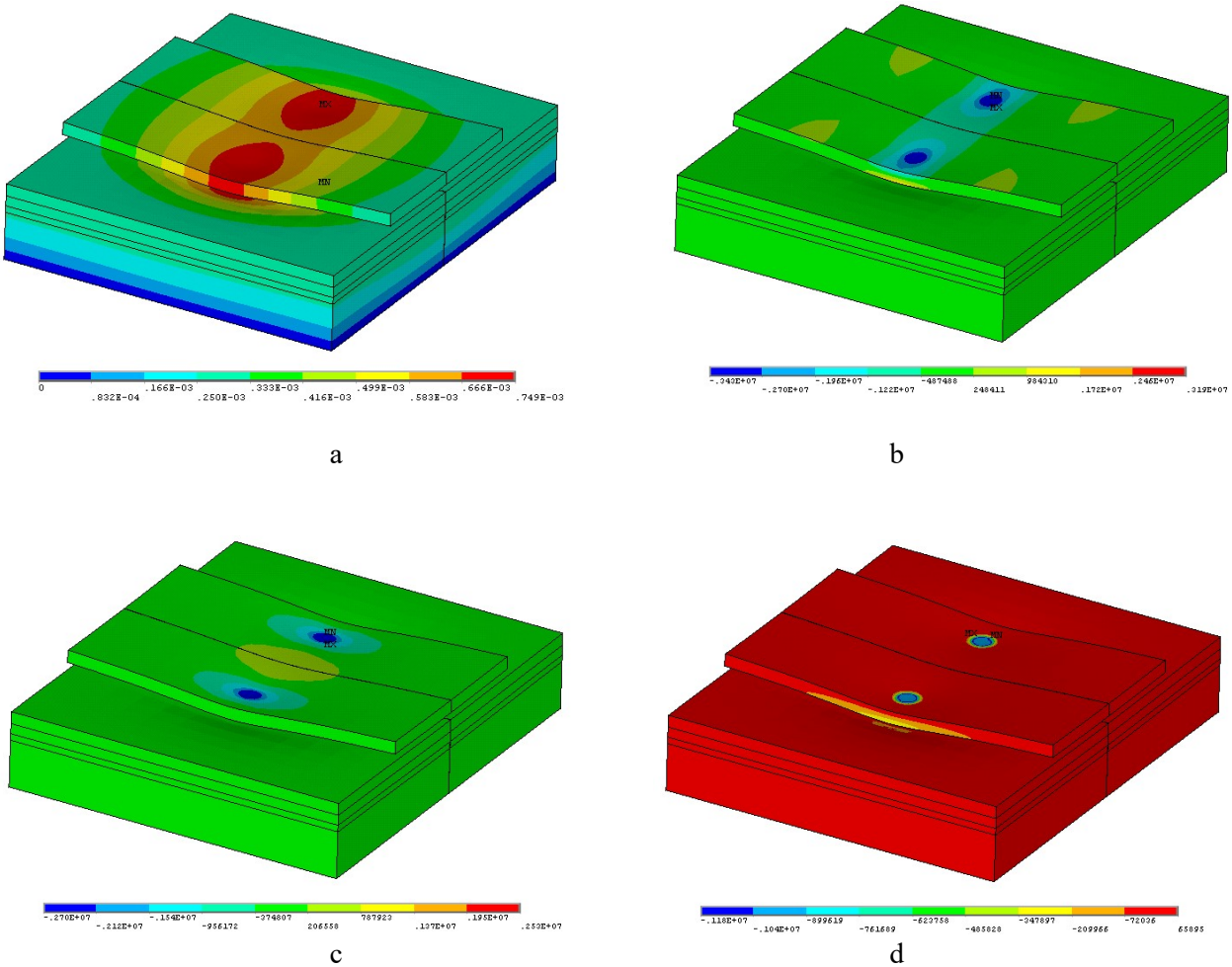
Figure 5 – Distribution of total displacements of model nodes (a) and stresses σ_x (b), σ_y (c), σ_z (d) in model elements for transport load placement option №2

Хоча розрахунок проводився для половини моделі з умовами симетрії, на малюнку зображено ці поля для повного виділеного фрагмента за рахунок дзеркального відображення отриманих результатів відносно площини симетрії.

На Рис. 7-8 показано поля напружень тільки для для елементів частини цементобетонної плити. Щоб показати розподіл напружень в поперечному перетині під штампом зроблено умовний перетин моделі плити площиною що проходить через центр штампу і частину плити умовно відкинуто. Додатні значення відповідають розтягу, від'ємні стиску.

Для всіх варіантів навантаження максимальний прогин плити знаходиться під штампом. Хоча для варіанту 1 він майже в 2 рази більший за прогин для варіанту 2 та 3. Відриву плити від основи не спостерігається, тобто для всіх точок плити зберігається умова контакту з основою.

При варіантах транспортного навантаження 2 і 3 напружено-деформований стан плити по напруженням та деформаціям має схожий характер, в той час для варіанту 1 поведінка плити дещо нагадує поведінку консольної балки.

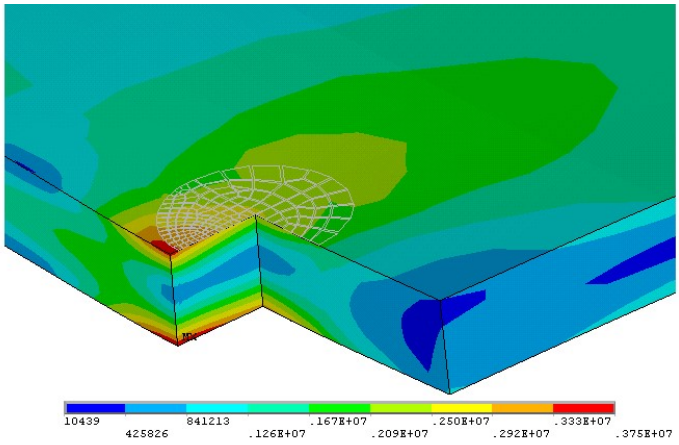


a b c d

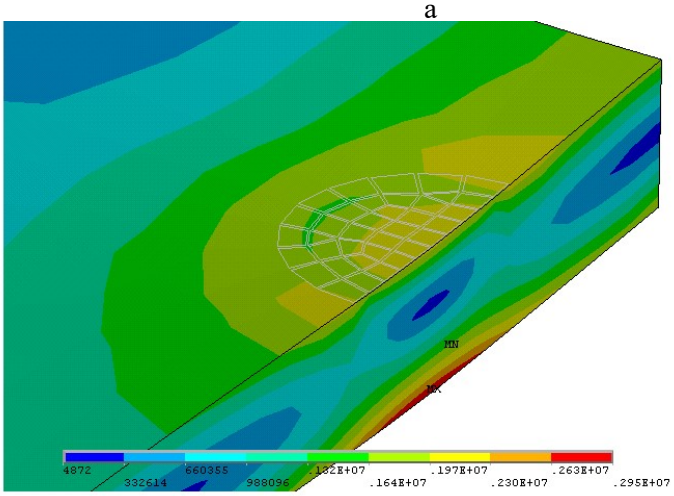
Рисунок 6 – Поле повних переміщень вузлів моделі (a) та напружень σ_x (b), σ_y (c), σ_z (d) в елементах моделі для варіанту розміщення транспортного навантаження №3

Figure 6 – Distribution of total displacements of model nodes (a) and stresses σ_x (b), σ_y (c), σ_z (d) in model elements for transport load placement option №3

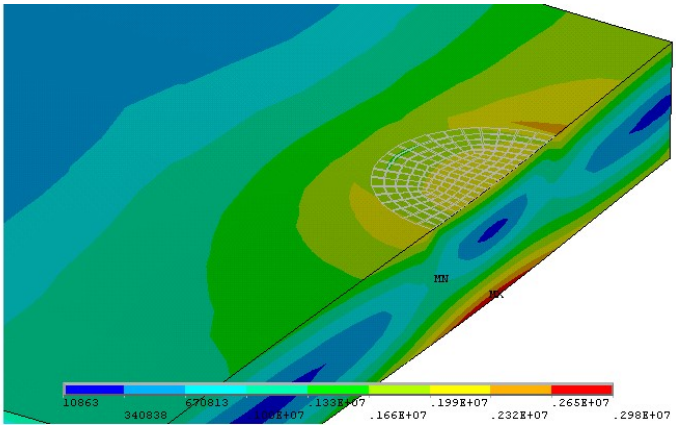
Максимальні розтягуючі напруження для всіх варіантів транспортного навантаження спостерігаються під штампом на нижній грані плити. Найбільші вони для варіанту 1. На верхній грані плити також виникають зони розтягуючих напружень на відстані від штампу 0,5-1,5 м, але вони складають приблизно третину від максимальних значень і є найбільшими для варіанту 1. Максимальна інтенсивність напружень за Мізесом спостерігається під штампом на нижній грані плити, а для варіанту 1 ще додатково на верхній кромці шва.



a

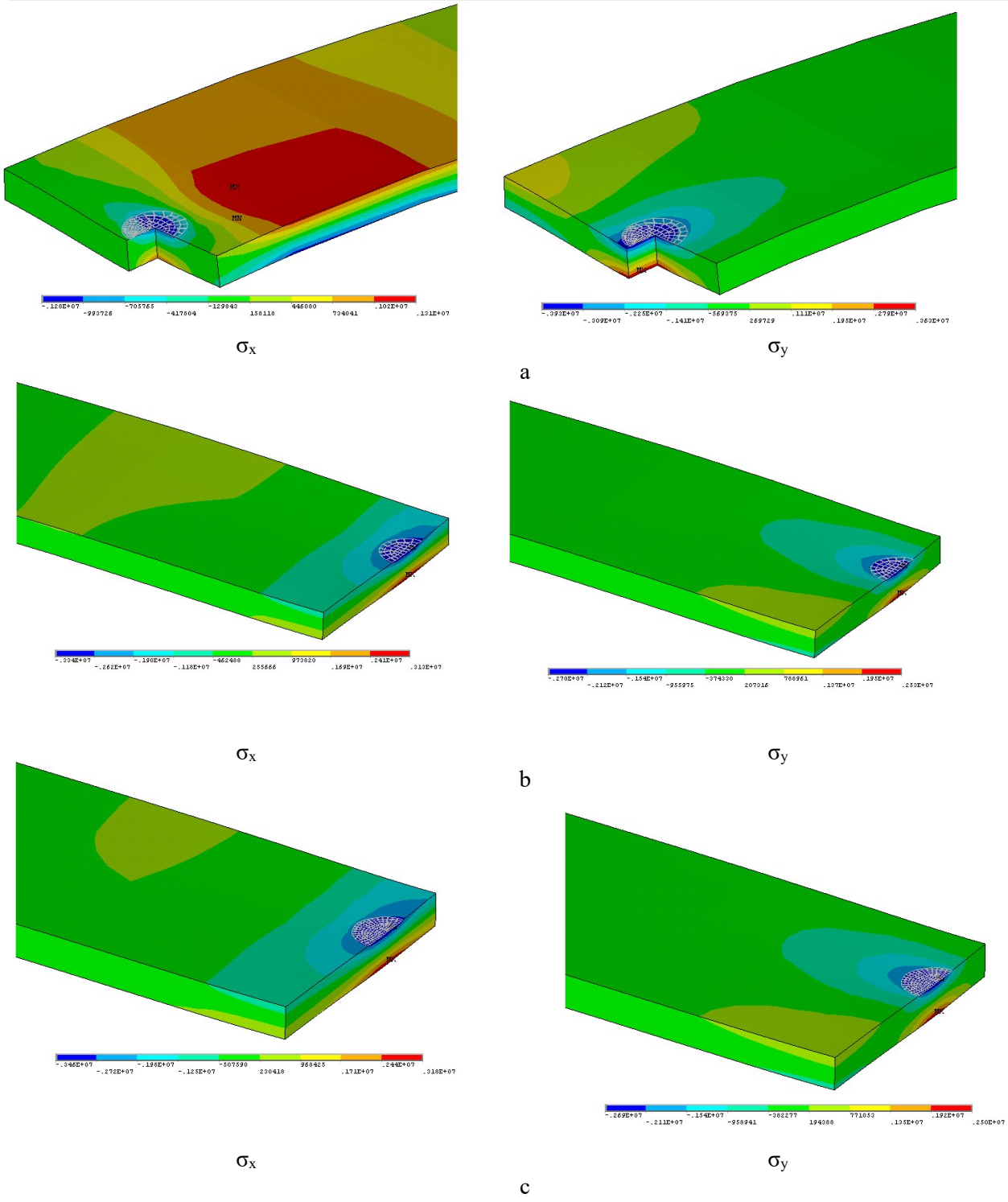


b



c

Рисунок 7 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом σ_M під штампом для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (Варіант №1 (a), варіант №2 (b), варіант №3 (c))
Figure 7 – Distribution of equivalent Mises stresses σ_M under the stamp for different options for placing the transport load (Option №1 (a), option №2 (b), option №3 (c))



σ_x σ_y

a

σ_x σ_y

b

σ_x σ_y

c

Рисунок 8 – Розподіл напружень σ_x та σ_y під штампом для різних варіантів розміщення транспортного навантаження (Варіант №1 (a), варіант №2 (b), варіант №3 (c))

Figure 8 – Distribution of stresses σ_x and σ_y under the stamp for different options for placing the transport load (Option №1 (a), option №2 (b), option №3 (c))

При багатоциклічному характері таких навантажень найбільш схильними до тріщеноутворення будуть ділянки матеріалу цементобетону розташовані на нижній грані плити під полосою накату через найбільші значення розтягуючи напружень, на верхній грані на полосі накату через знакозмінні напруження з високою амплітудою та на верхній та нижній кромках шва через максимальну інтенсивність напружень за Мізесом. Найбільша амплітуда переміщень основи буде спостерігатися під швом, що може приводити до ущильненя матеріалу основи та при негерметичності шва до виплескування матеріалу основи, утворенню пустот і зменшенню площи контакту.

Для конструкції з товщиною цементобетонної плити h=18 см при усіх варіантах розташування навантаження та значеннях модуля пружності бетону розтягуючи напруження перевищують допустимий рівень [2]. При збільшені модуля пружності E плити з 30000 МПа до 40000 МПа максимальні значення напружень зростають приблизно на 6-8 %, а максимальні переміщення зменшуються на 3-4 %. При збільшені товщини плити h з 18 см до 26 см максимальні напруження зменшуються приблизно на 40 %, а максимальні переміщення зменшуються на 9 %. Для зменшення максимальних значень напружень та переміщень в конструкції більш ефективним є збільшення товщини плити, хоча це приводить до зростання витрат матеріалу.

Висновки

1. Запропоновано розрахункову схему роботи цементобетонної плити жорсткого дорожнього одягу на багатошаровій основі автомобільної дороги від дії навантаження пневматичних коліс транспортних засобів для різних варіантів навантаження (1, 2, 3), які відрізняються положенням центру колеса по відношенню до краю плити. Дана розрахункова схема дозволила розробити скінчено-елементну модель даної конструкції для моделювання і визначення розтягуючих (σ) та дотичних (τ) напружень в цементобетонному покритті від дії навантаження транспортного засобу.

2. Проведено чисельний аналіз залежності величини максимальних напружень що виникають у конструкції жорсткого дорожнього одягу від параметрів цієї конструкції та положення навантаження від дії пневматичних коліс транспортних засобів.

3. Знайдено параметри конструкції жорсткого дорожнього одягу для яких виконується критерій міцності для забезпечення тріщиностійкості бетонного покриття.

Перелік посилань

1. Онищенко А.М. Числове моделювання впливу розташування транспортного навантаження на цеметобетонне покриття автомобільних доріг / А.М. Онищенко, С.М. Худолій, Н.П. Чиженко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2020. – Вип. 1 (46). С. 237–252.

2. ГБН В.2.3-37641918-557:2016 Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Київ, 2016. 75 с.

3. Онищенко А. М. Прогнозування та оцінка залишкових деформацій асфальтобетонного покриття з використанням методу скінченних елементів / А. М. Онищенко, С.М. Худолій, М.В. Гаркуша, О.М. Лещук / Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2017. – Вип. 1 (37). С. 308–320.

IINFLUENCE OF AXIAL LOAD POSITION ON THE STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE SLAB OF RIGID PAVEMENT

Onyshchenko Artur M., Doctor of Technical Science, Professor, National Transportation University, Head of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, +380687771899, https://orcid.org/0000-0002-1040-4530

Soloviov Ihor L., Ph.D., associate Professor, National Transport University, assistant professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, e-mail: i.soloviov@ntu.edu.ua, tel. +38 (044) 286-38-89, Kyiv, Boychuk str., 42, K. 612, https://orcid.org/0000-0001-5203-4139

Khudolii Serhiy.M., Ph D, associate Professor, National Transport University, assistant professor of the Department of Higher Mathematics, Kyiv, Ukraine, s_hoodoliy@i.ua, tel. +38 (044) 284-71-09, Kyiv, Boychuk str., 42, K. 510, https://orcid.org/0000-0001-6054-6708
Solovyov Vitaliy I., master's student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: vitalikyou@ukr.net, https://orcid.org/0009-0007-6543-6998

Abstract. The article is devoted to the analysis of the stress-strain state of a rigid pavement structure, arranged on a multilayer basis, depending on various options for the location of the axial transport load and the design features of the concrete layer.

The purpose of the work is to carry out finite element modeling of the stress-strain state of a concrete pavement of a highway, which is arranged on a multilayer basis and contains expansion joints between the plates, depending on various options for the location of the load relative to the expansion joints and structural features of the concrete pavement, such as its modulus of elasticity and thickness.

The object of study is concrete slab for road pavement.

Research method: statistical analysis of scientific publications, technical and regulatory literature, numerical calculation using the finite element method.

Considering that a complex spatial load acts on the concrete pavement of a highway, it is advisable to use a numerical method for determining the stress-strain state of a pavement based on solving the equations of elasticity theory - the finite element method as the most universal and effective. Its feature is a direct transition from a continuous object to a discrete analysis by dividing the area of the object under study into a number of subareas and approximating the fields of displacements, forces, stresses, for example, using an engineering and calculation complex. Three options for the location of transport loading are considered. As a result of the performed numerical modeling, the analysis of the stress-strain state of the cement concrete pavement was carried out, taking into account various design parameters, which makes it possible to establish the areas of stress concentration and predict the nature of the destruction of the cement concrete pavement.

Key words: automobile road, concrete covering, transport loads, stress fields, stress-strain state.

References

1. Onyshchenko A. M., Khudolii S. N., Chyzhenko N.P. Numerical modelling of influence location of transport load on concrete covering of highways. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2020. – Issue 1 (46). P. 237–252.
2. GBN V.2.3-37641918-557:2016 Motorways. Rigid road surface. Design. Kyiv, 2016. 75 p. [in Ukrainian].
3. Onishchenko A.M., Khudolii S.M., Harkusha M.V. Leshchuk A.N. Prediction and assessment of residual strain of asphalt pavement using finite element method. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2017. – Issue 1 (37). P. 308–320.

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-160-169

ЗАКОНОМІРНОСТІ ТА ТЕНДЕНЦІЇ ВПЛИВУ ЗОЛИ ВИНОСУ НА ҐРУНТИ

PATTERNS AND TRENDS OF THE EFFECT OF FLY ASH ON SOILS



Савенко В'ячеслав Якович, *Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном Національно транспортного університету, e-mail: svi1310@ukr.net ,*

https://orcid.org/0000-0001-8174-7728.



Скоропадський Віктор Вікторович, *аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном Національно транспортного університету, e-mail: viktorap333@gmail.com,*

https://orcid.org/0000-0002-4404-7447.

Анотація: У статті розглянуто можливість повторного використання золи виносу теплоелектростанцій у дорожньому будівництві з метою забезпечення енергозбереження та ресурсоефективності. Проаналізовано вплив золи на основні інженерно-геотехнічні показники ґрунтів, такі як межа текучості, межа пластичності, щільність, оптимальна вологість, гідравлічна провідність, опір проникненню, міцність на зсув та показник CBR. Встановлено, що зола виносу здатна покращувати властивості слабких глинистих ґрунтів завдяки своїм пуцолановим і гідравлічним властивостям. Додавання золи сприяє зменшенню пластичності, набухання та водонасичення, підвищує ущільнення й несучу здатність до певного оптимального вмісту, після якого спостерігається зниження показників. Оптимальна кількість золи залежить від її хімічного складу, гранулометрії та типу ґрунту. Застосування золи виносу є доцільним з екологічної та економічної точок зору, оскільки дозволяє зменшити кількість промислових відходів, скоротити використання природних матеріалів і забезпечити стійкість транспортних споруд.

Ключові слова: зола виносу, стабілізація ґрунтів, дорожнє будівництво, пуцоланові властивості, індекс пластичності, оптимальна вологість, фізико-механічні властивості, енергоефективність, утилізація відходів.

Вступ. Економічний розвиток будь якої країни нерозривно пов'язаний з галузями промисловості, енергетики та мережі транспортних зв'язків. В Україні основну кількість електроенергії виробляють атомні електростанції АЕС, а на другому місці за обсягами виробництва йдуть теплові електростанції – ТЕС і ТЕЦ. Теплові електростанції виробляють третину всієї електроенергії і чинять значний вплив на екологічну ситуацію. На них припадає понад 30 % викидів шкідливих речовин від загального обсягу викидів промислових підприємств. Цей вплив відбувається

через викиди шкідливих газів, а також накопичення продуктів спалювання – зол виносу. Утилізація золи виносу при повторному використанні є важливим аспектом економічних та екологічних інтересів. Щорічне виробництво золи виносу в Україні становить близько 6,5 млн тон, а також існує багато відвалів цього відходу промисловості, які займають великі площі та чинять негативний вплив на екологію. Золошлаковий відвал – спеціальне призначене місце для накопичення вторинних продуктів спалювання ТЕС(ТЕЦ) – золошлакових матеріалів. Золошлакові відвали містять токсичні елементи, забруднюють ґрунт та підземні води, потребують відчуження великих територій. В Україні обсяги невикористаних золошлакових відвалів приблизно оцінюються в кількості 360млн тон і вони займають великі площі [1]. Ці великі обсяги матеріалу утворюються внаслідок уловлювання дрібних частинок золи електрофільтрами, які утворюються в процесі спалювання твердого палива. Основними виробниками є теплові електростанції, які спалюють кам'яне та буре вугілля. Враховуючи ці чинники є велика потреба в утилізації зол і найкращою галуззю для цього є будівництво, зокрема транспортне. Кожного року відбувається здорожчання будівництва та сировини, а також дефіцит природніх матеріалів. Тому використання золи виносу в будівництві є взаємовигідним, адже воно досягає економічного та екологічного ефекту, що є концепцією сталого розвитку. В світі є багато прикладів успішного використання даної сировини, її використовують при виробництві цементу, бетону, цегли, шлакоблоків, як добавка до ґрунтів, кам'яних сумішей та асфальтобетону і це не повний перелік шляхів використання. При використанні золи як додаток до цементу економиться енергія, яка потрібна на його виготовлення та зменшуються викиди CO_2 які виникають при виготовленні. Лідерами утилізації золи при повторному використанні в світі є США, Китай, Індія, Фінляндія, Франція, Велика Британія та ін. В Україні золу використовують тільки до 20% від утворення [2].

Від виду твердого палива, а саме типу вугілля залежить якість побічного продукту – золи виносу, а як наслідок спосіб використання. Найбільш кількісно ефективним способом повторного застосування золи є поєднання з ґрунтами, де можна вводити її до 30% від маси суміші. Використання золи-винесення для стабілізації та укріплення ґрунту зменшить попит на звалища для цього попелу та обмежить використання цінних заповнювачів. Зола виносу є прогресивним матеріалом для укріплення ґрунтів через свою низьку об'ємну вагу, хорошу стисливість, пуцоланові властивості та економічний ефект [3,4].

Мета роботи. Дослідити способи використання золи в поєднанні з ґрунтами. Опис хімічного складу золи та її мінералогія, встановлення степеню впливу цих показників на укріплення. Встановлення основних характеристик та переваг золи виносу для використання в будівництві. Рекомендації щодо вибору ґрунту та його характеристик для досягнення кращого результату в поєднанні із золою. Виявлення тенденцій та закономірностей впливу золи на властивості ґрунту при укріпленні, на основі аналізу зарубіжних досліджень. Встановлення взаємозв'язків та впливів між різними інженерно-геологічними показниками.

Виклад основного матеріалу. Покращувати якість основи з ґрунту можна стабілізацією, яка буває як механічна так і хімічна. Хімічна стабілізація полягає в введенні речовин з добавками, які вступають в реакцію з ґрунтом та його укріплюють утворюючи стійку основу. Найпоширенішим матеріалом для укріплення є цемент в кількості 8-15%. При будівництві доріг використання ґрунтових мас дуже велике що призводить до значного застосування цементу та збільшення економічних затрат. Для зменшення витрат можна використовувати промислові відходи, зокрема золи теплоелектростанцій [5].

Властивості золи залежать від мінералогічного складу вугілля і вони можуть сильно варіюватися в різних ТЕС. Основні мінерали вугілля є карбонати, сульфіди, глинистий матеріал. До глинистого матеріалу відносять тонкодисперсні алюмосилікатні мінерали з пластинчастою структурою, які ведуть себе як глини, це можуть бути каолініти, іллiти, смектити. На прояв

гідравлічних властивостей впливає вміст карбонатів, а саме CaO і за цією ознакою золи поділяються на висококальцієві з вмістом CaO > 20% (активні), які проявляють не тільки гідравлічні властивості, а й пуцоланові, низькококальцієві з вмістом CaO < 10% (слабоактивні) - в більшості проявляють пуцоланові властивості. Комбінована гідравлічна та пуцоланова активність проявляється через високий вміст саме вільного CaO, який при контакті з водою гідратується до $Ca(OH)_2$, що вступає у вторинну реакцію з SiO_2/ Al_2O_3 утворюючи при цьому гідросилікати кальцію (C–S–H/ C–A–H). Гелі які утворюються в процесі хімічних реакцій забезпечують цементуючий ефект підвищуючи міцність і водостійкість стабілізованого матеріалу. Ще одна важлива характеристика це модуль основності МО – інтегральна характеристика хімічного складу. МО > 0,9 – основні золи, 0,6-0,9 – кислі, МО < 0,6 – надкислі. По мірі зменшення МО вміст оксиду кальцію зменшується, а вміст склоподібної фази навпаки збільшується. Золи в своєму складі містять компоненти SiO_2 (діоксид кремнію або кремнезем, до 65%), Al_2O_3(діоксид алюмінію або глинозем, до 25%), CaO, MgO, K_2O, Na_2O, завдяки саме цим мінералам золу й використовують в будівництві. У кристалічній фазі можлива наявність двокальцієвого силікату, муліту, геленіту, псевдоволастоніту й інших мінералів.

В дорожньому будівництві золу в ґрунті використовують для спорудження земляного полотна, модифікації мінералогічного складу ґрунтів, стабілізація ґрунтів (зміцнення слабких ґрунтів - піски, торфовища), як добавка до в’яжучих з метою їх економії та зміцнення ґрунтів. Золу сухого вловлення можна застосовувати як самостійне в’яжуче (якщо вона активна), а також як добавку до неорганічних і органічних в'яжучих речовин [6]. Якщо зола використовується як добавка до в’яжучих то вона виступає в ролі активної мінеральної алюмінєво-кремнієвої добавки в кількості 5-25% від ваги клінкеру. Переваги використання продуктів спалювання вугілля у дорожньому будівництві:

- Економічність
- Низька щільність знижує витрати на транспортування
- Доступність у всіх регіонах
- Висока міцність та морозостійкість
- Екологічність через усунення золовідвалів

Фізичні властивості золи виносу – низька щільність, висока механічна міцність, хімічна інертність, термостійкість, низька теплопровідність. Завдяки цим властивостям навіть неактивна зола якісно використовується в ґрунтах. Вона використовується для поліпшення гранулометрії і як наслідок поліпшення ущільнення та структури. Також її можна використовувати як частковий замінник природного ґрунту, наприклад піску для поліпшення властивостей стисливості. Активні золи що проявляють пуцоланові та гідравлічні властивості можуть використовуватися як самостійне в’яжуче при укріпленні ґрунтів, особливо глинистих з числом пластичності до 21. Внаслідок застосування зол для укріплення ґрунту частинки цементуються і формується штучне каменеподібне середовище, яке підвищує несучу здатність та водостійкість. Основні мінерали ґрунту мають максимальну адсорбційну здатність у перші 4 - 8 днів, тому найбільший ріст міцності досягається в цей період.

При укріпленні ґрунтів потрібно надавати перевагу карбонатним ґрунтам які набувають після укріплення більшу міцність порівняно з некарбонатними. Для прискорення процесів твердіння, підвищення міцності і морозостійкості укріплених сумішей рекомендується вводити в них наступні водорозчинні активатори: технічний хлористий кальцій; технічний хлористий натрій; технічний натрій сірчанокислий; хлорне залізо. Як активатор, для ґрунтових сумішей з використанням золошлакових матеріалів ТЕС укріплених вапном, може застосовуватись портландцемент або гіпс.

Щоб досягнути найбільшого ефекту від укріплення, потрібно проводити підбір складу експериментальним шляхом з врахуванням властивостей матеріалів та погодно-кліматичних умов.

Суміші модифіковані золою та укріплені в’яжучим повинні мати оптимальну вологість, але для глинистих ґрунтів не більше 0,55 WT, для інших – не більше 0,75 WT (WT – вологість на межі текучості). Дослідження показали, що глини та суглинки з вмістом золи потрібно додатково обробляти вапном для поліпшення властивостей [7].

Показники пластичності та ущільнення покращуються при застосуванні золи разом з вапном. Існують переконливі дослідження які вказують ефективність застосування золи в поєднанні з вапном,

для досягнення кращого результату [8]. В такому випадку кальцій із золи та вапна взаємодіє з вільним глиноземом та силіцієм ґрунту та золи утворюючи стабільні сполуки (C–S–H/ C–A–H) сприяючи довготривалому зміцненню. При цьому утворюється більш компактна мікроструктура, що покращує механічні властивості ґрунту. В даному випадку цементація відбувається повільніше ніж з портландцементом, але з більшою довговічністю. Найкращі показники досягаються при тривалості до 90діб, проте і далі відбувається незначне зростання міцності [9,10].

Випробування показують, що зола впливає на зміну оптимальної к-сті вологи та на максимальну суху щільність. При збільшенні вмісту золи потреба оптимального вмісту вологи зростає, а щільність зменшується. Якщо зола не є висококальцієвою то ефекту укріплення від застосування однієї золи недостатньо, кращі якості досягаються при поєднанні з малою кількістю цементу, при цьому формується тоберморит і утворюється більш щільна та стійка структура [11]. Використання золи в поєднанні з цементом сприяє утворенню піни, яка і заповнює пустоти формуючи більш надійну кристалічну структуру [12].

Стабілізація слабких ґрунтів є важливим аспектом дорожнього будівництва і є необхідною для підвищення ефективності роботи дорожнього одягу, а також для зменшення витрат на обслуговування. До слабких ґрунтів відносяться набухаючі ґрунти які хімічно активні і дуже залежні від вологи, що спричиняє їх зміну об’єму, сюди відносяться глинисті ґрунти. Значне набухання та усадка призводить до фізичних перетворень: у сухому стані вони стають крихкими й жорсткими, а у вологому — повністю втрачають міцність, внаслідок чого стійкість конструкцій порушується. Також цикли заморожування та відтавання несуть негативний та руйнуючий вплив на дорожній одяг. Тому потрібне досягнення меншого водонасичення та збільшення морозостійкості ґрунту шляхом збільшення коефіцієнту фільтрації. Враховуючи наявність великої кількості слабких ґрунтів на території України, дослідження впливу золи на них є досить актуальним. Зола виносу через наявність склоподібних сферичних частинок не утримує воду так як глина. Це означає, що вона знижує капілярність і здатність ґрунту утримувати воду. При змішуванні з глинистим (набухаючим) ґрунтом зола розриває суцільну глиняну структуру внаслідок чого менше утворюються тонкі пори, які утримують вологу. А завдяки пуцолановим реакціям і цементації зменшується вільна волога. Тому ґрунт із золою менш чутливий до змін вологості і менше набухає та осідає. Але важливою умовою є кількість, тому що при надлишковому вмісті золи вона працює як інертний пилоподібний матеріал що збільшує водопроникність. Дослідження що описані в роботі [13] свідчать про зниження пластичності та показнику вільного набухання. Проте отримання однорідної суміші на практиці стало однією з ключових проблем. Для кращого ефекту запропоновано пошарове укладання із застосуванням принципу дискової борони.

Крім того, було встановлено, що використання золи зменшує високу стисливість ґрунтів і забезпечує достатню зсувну міцність для стабільності схилів [14].

В роботі [15] для визначення впливу золи на ґрунт проводилися такі тести –

- Визначення питомої ваги
- Визначення оптимальної вологості та максимальної щільності
- Випробування на одновісне стискання
- Тест CBR

Дослідження проводилися з різним вмістом золи виносу. Було встановлено що зі збільшенням вмісту золи у суміші значення межі текучості та межі пластичності зростають. Подальше збільшення вмісту золи-винесення у ґрунті сприяє зменшенню значень індексу пластичності, що вказує на зниження стисливості суміші. Зола впливає на зниження ступеня набухання ґрунтової суміші і ця залежність є обернено пропорційною. Вплив на щільність є непостійним, спочатку щільність зростає, а потім зменшується це свідчить про зниження міжчастинного зсувного опору. Також при різних значеннях вмісту золи змінюється оптимальна вологість. При пікових значеннях сухої щільності зростає коефіцієнт міжчастинного зсувного опору, що збільшує загальні механічні властивості

ґрунтового масиву. Тести CBR які проводилися на зразках при максимальній сухій щільності та оптимальній вологості показали що додавання золи-винесення спричиняє підвищення значень CBR до певного моменту, після чого відбувалося зниження. Це свідчить про зниження міцності, що й було отримано в результаті випробувань на одновісне стискання. Існують закономірності зміни міцності зразків аналогічні до закономірностей несучої здатності. Фактично ці показники взаємопов'язані і один показник характеризує інший. Якщо показники міцності зростають то відповідно і несуча здатність збільшується та навпаки. Дані демонструють типову залежність — спочатку зростання, потім спад міцності з надмірним вмістом золи. Це є ознакою залежності міцності від значення щільності. За результатами лабораторних випробувань було встановлено, що значення міцності зразків прямо-пропорційне до вмісту золи, але тільки до певного моменту, так званої оптимальної кількості. Після перевищення оптимальної кількості тенденція впливу змінюється на обернено-пропорційну. Враховуючи попередню інформацію виникає залежність зміни міцності через вплив коефіцієнту міжчастинного зсувного опору (табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив вмісту золи-винесення на інженерні властивості ґрунту
Table 1 – Influence of fly fsh content on the engineering properties of soil

Властивості	Вміст золи				
	0%	5%	10%	15%	20%
Показник диференційного вільного набухання (DFS), %	69	59,7	52,5	41	34
Значення показника CBR, %	2,189	2,043	2,335	2,262	1,265
Межа міцності при стиску,	0,1688	0,125	0,333	0,1779	0,1692

Подібні випробування проводилися також в роботі [16], де було встановлено що межа текучості зменшується, а межа пластичності збільшується зі збільшенням вмісту золи. Коефіцієнт фільтрації зменшується зі збільшенням вмісту золи. Це зниження гідравлічної провідності добре корелює зі збільшенням максимальної сухої питомої маси зі збільшенням вмісту золи. Різні результати в порівнянні з попереднім дослідженням вказують що вплив на одні й ті ж показники може бути різний, залежно від виду золи. На це впливає не тільки хімічний склад золи, а й її гранулометрія. Показники консолідації та набухання в даному дослідженні зменшувалися при збільшенні вмісту золи. Як наслідок також знижується потенціал та тиск набухання. Слід відзначити що значний вплив відбувається при початковому введенні золи, а при подальших збільшеннях вплив стає менш суттєвим. Досліди показали, що при зростанні кількості золи зменшується показник оптимальної вологості, а показник щільності зростає. Навіть при однаковій кількості вологи при збільшенні вмісту золи зростає щільність, це означає що суміш стає більш стійкою і частинки в структурі розміщуються ближче один до одного. Дані тенденції показані й в іншій роботі [17], де описано, що з підвищенням вмісту золи в ґрунтах знижується їх гідравлічна провідність, зменшується оптимальна вологість і зростає максимальна суха щільність. Збільшується енергія ущільнення, що позитивно впливає на стабільність ґрунту. Це в свою чергу впливає на опір проникнення, який також зростає при збільшенні вмісту золи. Міцність на зсув зменшується зі зростанням вологості, проте збільшується при зростанні вмісту золи в суміші. Така тенденція простежується для всіх значень вологості і це пов'язано із зростанням щільності, яке описано вище (табл. 2).

Експерементальні дослідження [17] також показали, що зола в набухаючих ґрунтах сприяє зниженню пластичності та набухання. Оптимальна кількість золи при цьому становить 20%, корисний ефект досягається завдяки модифікації гранулометричного складу та хімічним реакціям. Хімічні реакції спричиняють флокуляцію глинистих частинок, що в подальшому призводить до прояву пуцоланових твердіючих ефектів.

Таблиця 2 – Відомість зміни інженерно-геотехнічних показників ґрунту під впливом золи
Table 2 – Record of changes in the engineering and geotechnical properties of soil under the influence of fly ash

Властивості	Вміст золи				
	0%	5%	10%	15%	20%
Межа текучості, %	80	77	75	73	70
Межа пластичності, %	28	31	35	40	44
Індекс вільного набухання	250	200	165	140	125
Потенціал набухання, %	10,8	8,75	7,2	6,0	5,5
Тиск набухання, кПа	90	72	60	50	45
Оптимальний вміст вологи, %	40	38	35	33	31
Максимальна суха густина, г/см^3	1,375	1,391	1,405	1,419	1,430
Гідравлічна провідність, см/с	$9{,}70 \times 10^{-7}$	–	$6{,}02 \times 10^{-7}$	–	$3{,}95 \times 10^{-7}$
Опір проникненню, МПа	1,753	1,822	1,911	2,103	2,302
Міцність на зсув, МПа	147	154	161	176	186

Інші дослідження, які опубліковані в роботі [18]. показують вплив активної та неактивної золи на показник CBR глинистих ґрунтів. У випробуваннях вміст золи змінювався від 0 до 100%, спочатку показник CBR зростав зі збільшенням вмісту золи після чого досягав максимуму і йшов на спад. В точці максимуму і є оптимальний вміст золи. При подальшому збільшенні вмісту золи відбувався спад і знову зростання до другого оптимуму. Зростання досягається завдяки збільшенню тертя між частинками, та додатковою когезією з ґрунтом.

За дослідженнями [19] встановлено наступні закономірності: вплив на межу текучості, індекс пластичності та усадку ґрунту обернено пропорційний вмісту золи. Зменшення усадки пояснюється тим що зола має меншу властивість усадки та когезії. Зменшення лінійної усадки може пояснюватися надходженням відносно меншої кількості води, що підтверджується значеннями межі текучості. Показник питомої ваги зменшується по мірі збільшення введення кількості золи. Це пояснюється тим, що зола має меншу питому вагу через пустотність частинок то вона й зменшує питому вагу суміші в яку вводиться. Але суха густина збільшується при ущільненні через поліпшення гранулометрії та щільнішому розміщенню частинок в структурі масиву. При внесенні золи відбувається зростання оптимальної вологості завдяки явищу флокуляції та агломерації. Однією з причин збільшення оптимальної вологості є схильність ґрунтово-зольної суміші поглинати більше вологи для завершення реакцій катіонного обміну. Значення показника CBR зростає до певного моменту так званої оптимальної кількості золи. Після перевищення оптимального показника вмісту золи відбувається спад.

Проаналізувавши результати багатьох досліджень можна побудувати схематичні графіки впливу на основні параметри. Вони схематичні тому що показують принципи та закономірності впливу на показники, але для конкретних значень потрібні індивідуальні випробування. Це пояснюється різними фізичними і хімічними властивостями як зол так і ґрунтів. Тому степінь впливу та оптимальний вміст золи буде різний залежно від поєднання виду компонентів.

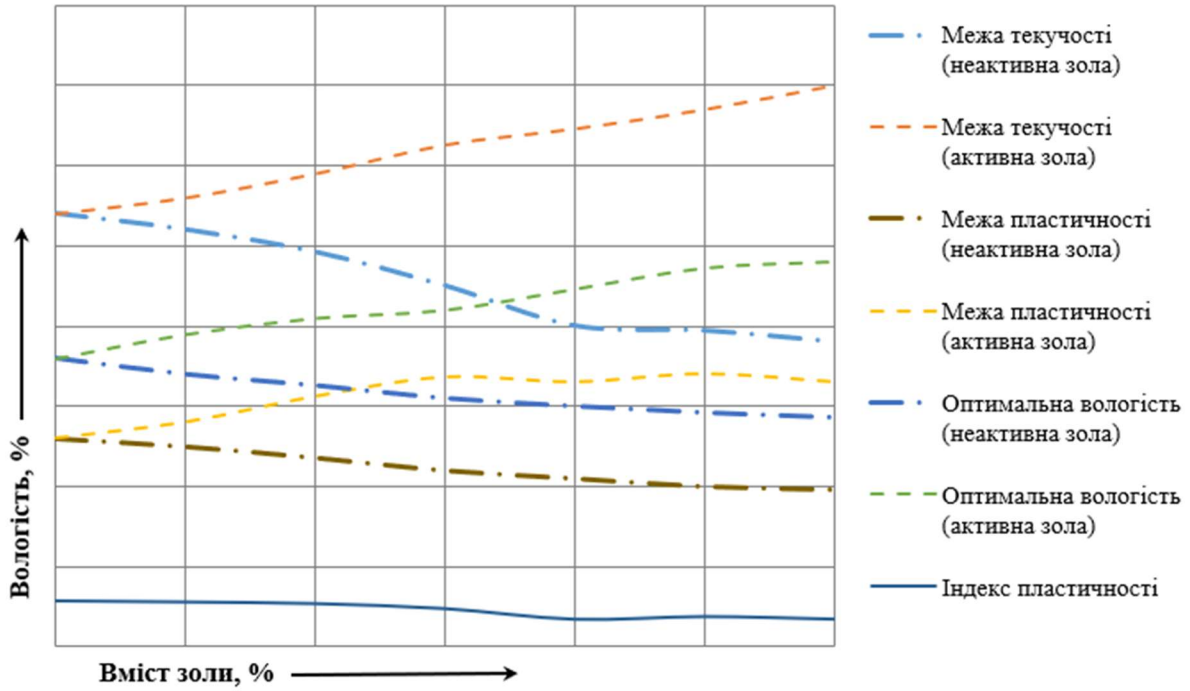
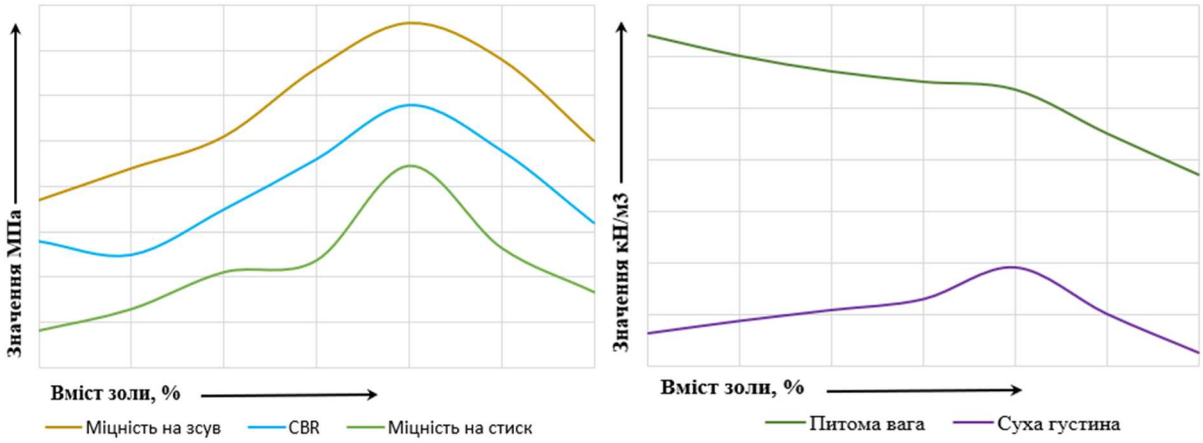


Рисунок 1 – Графік впливу золи на зміну вологоємних інженерних показників
Figure 1 – Graph of the influence of fly ash on the change of moisture-related engineering parameters



а) б)

Рисунок 2 – Графік впливу золи на інженерно-геологічні показники; (а) – вплив на міцнісні показники; (б) – вплив на об'ємно-вагові показники.
Figure 2 – Graph of the influence of fly ash on engineering and geological parameters: (a) influence on strength parameters; (b) influence on volumetric-weight parameters.

Висновки

Зола виносу теплоелектростанцій є перспективним вторинним матеріалом для стабілізації слабких ґрунтів у дорожньому будівництві.

Її ефективність зумовлена пуцолановими та гідравлічними властивостями, що забезпечують цементацію частинок ґрунту та формування міцної структури.

Зі збільшенням вмісту золи відбувається зростання межі текучості та межі пластичності, однак індекс пластичності та показники набухання зменшуються. Однак вплив на межу текучості і межу пластичності не завжди сталий і його зміна не характеризується однаковими тенденціями. На це впливає хімічний склад золи та ґрунту.

Оптимальна кількість золи забезпечує підвищення щільності, міцності та показника CBR, після перевищення оптимуму ці параметри починають знижуватися.

Використання золи у поєднанні з цементом або вапном підвищує міцність, морозостійкість і водостійкість укріплених ґрунтів.

Застосування зол у будівництві сприяє реалізації принципів сталого розвитку, знижує екологічне навантаження від золошлакових відвалів і скорочує витрати на природні ресурси.

Враховуючи надану інформацію виникають певні протирічні твердження щодо тенденцій зміни певних параметрів. Вони виникають на основі того що в різних дослідженнях використовувались різні матеріали із своїми хімічними властивостями. Тому існує потреба подальших досліджень з використанням різних типів ґрунтів і зол України, для встановлення чіткого впливу, тенденцій та взаємозв'язків при поєднанні цих матеріалів.

Перелік посилань

1. Крайнюк О., Буц Ю., Лоцман П., Барбашин В. Використання золошлаків у дорожньому будівництві з позиції екологічної безпеки. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 39. 2022. С.41-50.

2. Дерев'янко В. М., Мосьпан В. І., Колохов В. В. Дзюбан О. В., Мальцев С. В. Основні напрямки досліджень із використання золи тес у виробництві будівельних матеріалів. Український журнал будівництва та архітектури, № 1 (007), 2022. С.38-44.

3. Ambarish G. Utpal D. Bearing ratio of reinforced fly ash overlying soft soil and deformation modulus of fly ash. Geotextiles and Geomembranes Volume 27, Issue 4, August 2009. P.313-320.

4. A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz, B. García, E. Prieto. The use of non-conventional additives in Marls stabilization. Applied Clay Science Volume 51, Issue 4, March 2011. P.419-423.

5. O. Ignatova, I. Sebelev, A. Dyatchina.. Use of Heat Power Plants' Ash in Road Construction. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 953, 2020. P.8.

6. Lahtinen P. Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads : dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki, 2001. 102 p.

7. Звіт щодо проведення аналізу ситуації з золошлаковими відвалами на території Львівської та Івано-Франківської областей в рамках реалізації Проекту Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007 – 2013 «Розвиток підприємництва шляхом покращення доступу до інвестиційних ділянок у місті Любачів та ґміні Любачів, а також відновлення деградованих земель Яворівського району та м.Новий Розділ», Частина 2. Львів: «Спільнота Соціально Відповідальний Бізнес», 2015. 73 с.

8. U. S. Army, U. S. Navy, U. S. Air Force, Soil Stabilization for Pavements, InUniversity Press of the Pacific. Honolulu, Hawaii, 2005.

9. S. Kolias, V. Kasselouri-Rigopoulou, A. Karahalios. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. Cement and Concrete Composites Volume 27, Issue 2, February 2005. P.301-313.

10. T.A. Kumar, T. Thyagaraj, R.G. Robinson. Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement 2022. P.160-171.

11. F. Khan, B. Das, N. Dewanga. Determination of geotechnical properties and stability of expansive soil using fly ash. Walailak Journal of Science and Technology (WJST) 2021. P.18.

12. M. F. Noaman, M.A. Khan, Kausar Ali, Amer Hassan. A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. Cleaner Materials 6(3):100151, 2022. P.14.

13. B. Kumar, R. Sharma. Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 2004. P.7.
14. S. Bhuvaneshwari, R.G. Robinson, S.R. Gandhi, Stabilization Of Expansive Soils Using Fly ash. Tunnelling and Underground Space Technology 16, 2006.
15. P. G. Kumar, H.Sesetti. Stabilization of expansive subgrade soil by using fly ash. Materials Today Proceedings 45(6), 2020. P.4.
16. 13. B. Kumar, R. Sharma. Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering asce / july 2004. P. 764-767.
17. Pandian N., Krishna K. California Bearing Ratio Behavior of Cement-Stabilized Fly Ash-Soil Mixes.Journal of Testing and Evaluation 30, 2002. P.6.
18. Phanikumar B., Sharma R. Volume Change Behavior of Fly Ash-Stabilized Clays. Journal of Materials in Civil Engineering 19:1, 2007. P.67-74.
19. A. Dixit, M. Nigam, R. Mishra. Effect of fly ash on geotechnical properties of soil. International Journal of Engineering Technologies and Management Research Volume 3, Issue 5, 2016. P.7-14.

PATTERNS AND TRENDS OF THE EFFECT OF FLY ASH ON SOILS

Savenko Vyacheslav Ya, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Construction and Property Management at the National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: svi1310@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-8174-7728.
Skoropadskyi Viktor V., PhD student of the Department of Transport Construction and Property Management at the National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: viktorap333@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4404-7447.

Summary. The article examines the potential for the reuse of fly ash from thermal power plants in road construction to promote energy conservation and resource efficiency. The influence of fly ash on the main engineering and geotechnical properties of soils—such as liquid limit, plastic limit, density, optimum moisture content, hydraulic conductivity, penetration resistance, shear strength, and cbr index—has been analyzed. It was found that fly ash can improve the properties of weak clay soils due to its pozzolanic and hydraulic characteristics. The addition of fly ash reduces plasticity, swelling, and water saturation, while increasing compaction and bearing capacity up to a certain optimal content, beyond which the indicators tend to decrease. The optimal amount of fly ash depends on its chemical composition, particle-size distribution, and soil type. The use of fly ash is considered environmentally and economically feasible, as it reduces industrial waste, decreases the consumption of natural materials, and enhances the sustainability of transport structures.

Keywords: fly ash, soil stabilization, road construction, pozzolanic properties, plasticity index, optimum moisture content, physical and mechanical properties, energy efficiency, waste utilization.

References

1. Krainiuk O., Buts Yu., Lotsman P., Barbashyn V. Use of Ash and Slag in Road Construction from the Perspective of Environmental Safety. Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies. Series “Transport Systems and Technologies”. Issue 39, 2022. P.41–50.
2. Derevyanko V. M., Mospan V. I., Kolokhov V. V., Dzyuban O. V., Maltsev S. V. Main Research Directions on the Use of TPP Ash in the Production of Building Materials. Ukrainian Journal of Construction and Architecture, No. 1 (007), 2022. P.38–44.
3. Ambarish G. Utpal D. Bearing ratio of reinforced fly ash overlying soft soil and deformation modulus of fly ash. Geotextiles and Geomembranes Volume 27, Issue 4, August 2009. P.313-320.
4. A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz, B. García, E. Prieto. The use of non-conventional additives in Marls stabilization. Applied Clay Science Volume 51, Issue 4, March 2011. P.419-423.
5. O. Ignatova, I. Sebelev, A. Dyatchina.. Use of Heat Power Plants' Ash in Road Construction. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 953, 2020. P.8.

6. Lahtinen P. Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads : dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki, 2001. 102 p.

7. Report on the Analysis of the Situation with Ash and Slag Dumps in the Territories of Lviv and Ivano-Frankivsk Regions within the Framework of the Poland–Belarus–Ukraine Cross-Border Cooperation Programme 2007–2013 "Development of Entrepreneurship by Improving Access to Investment Sites in the City and Commune of Lubaczów, and Restoration of Degraded Lands in Yavoriv District and the City of Novyi Rozdil." Part 2. Lviv: "Socially Responsible Business Community," 2015. 73 p.

8. U. S. Army, U. S. Navy, U. S. Air Force, Soil Stabilization for Pavements, InUniversity Press of the Pacific. Honolulu, Hawaii, 2005.

9. S. Kolias, V. Kasselouri-Rigopoulou, A. Karahalios. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. Cement and Concrete Composites Volume 27, Issue 2, February 2005. P.301-313.

10. T.A. Kumar, T. Thyagaraj, R.G. Robinson. Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement 2022. P.160-171.

11. F. Khan, B. Das, N. Dewanga. Determination of geotechnical properties and stability of expansive soil using fly ash. Walailak Journal of Science and Technology (WJST) 2021. P.18.

12. M. F. Noaman, M.A. Khan, Kausar Ali, Amer Hassan. A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. Cleaner Materials 6(3):100151, 2022. P.14.

13. B. Kumar, R. Sharma. Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 2004. P.7.

14. S. Bhuvaneshwari, R.G. Robinson, S.R. Gandhi, Stabilization Of Expansive Soils Using Fly ash. Tunnelling and Underground Space Technology 16, 2006.

15. P. G. Kumar, H.Sesetti. Stabilization of expansive subgrade soil by using fly ash. Materials Today Proceedings 45(6), 2020. P.4.

16. 13. B. Kumar, R. Sharma. Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering asce / july 2004. P.764-767.

17. Pandian N., Krishna K. California Bearing Ratio Behavior of Cement-Stabilized Fly Ash-Soil Mixes.Journal of Testing and Evaluation 30, 2002. P.6.

18. Phanikumar B., Sharma R. Volume Change Behavior of Fly Ash-Stabilized Clays. Journal of Materials in Civil Engineering 19:1, 2007. P.67-74.

19. A. Dixit, M. Nigam, R. Mishra. Effect of fly ash on geotechnical properties of soil. International Journal of Engineering Technologies and Management Research Volume 3, Issue 5, 2016. P.7-14.

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-170-180

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ ДЛЯ ОБЛІКУ ДОВЖИНИ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

PRACTICAL ASPECTS OF USING SATELLITE NAVIGATION TO MEASURE THE LENGTH OF PUBLIC ROADS



Славінська Олена Сергіївна, *Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна,*
e-mail: elenaslavin9@gmail.com

https://orcid.org/0000-0002-9709-0078



Дуля Михайло Віталійович, *аспірант, молодший науковий співробітник відділу мостів Центру мостів та будівельних конструкцій, Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), Київ, Україна,*
e-mail: mykhailo.dulia@gmail.com

https://orcid.org/0000-0002-1916-8642

Анотація. У статті розглядаються актуальні питання інформаційного забезпечення дорожньої галузі України в контексті цифровізації та впровадження геоінформаційних систем. Відсутність достовірних даних щодо мережі автомобільних доріг, характеристик транспортних потоків, альтернативних рішень та їх наслідків негативно впливають на ефективність функціонування дорожньої інфраструктури. Основною метою є створення методу обліку автомобільних доріг на основі систематизованої бази актуальних просторових даних, що дозволяє обґрунтовано планувати заходи з утримання, ремонту та розвитку дорожньої мережі.

Використання GNSS-технологій (GNSS — Global Navigation Satellite System) дозволяє точно визначати просторові координати дорожніх об’єктів, а геометричне погіршення точності (PDOP — Position Dilution of Precision) є критичним показником точності позиціонування при роботі з лінійними об’єктами. Розглянута варіативність значень PDOP залежно від геометрії супутників та польових умов, а також описані методи зниження похибки при GPS-зйомці.

Окрему увагу приділено методичним рекомендаціям щодо розрахунку облікової довжини автомобільних доріг, розробленню цифрової моделі дорожньої мережі для створення передумов для інтеграції інтелектуальних транспортних систем, які широко використовуються у світовій практиці для оптимізації трафіку, збору плати за проїзд, управління паркуванням тощо.

Незважаючи на високий рівень теоретичної готовності галузі, реалізація зазначених заходів ускладнена через обмеженість фінансування, зумовлену воєнним станом. Водночас впровадження цифрових рішень є стратегічно важливим для забезпечення ефективного управління дорожнім господарством у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: автомобільна дорога, облік довжини, геопросторові дані, супутникова навігація, координатна площина, лінійна прив'язка, похибка, цифрова модель.

Вступ. Відсутність достовірної інформації щодо довжини мережі автомобільних доріг, характеристик транспортних потоків, наявних альтернативних рішень, їх ймовірності та потенційних наслідків, а також відсутність раціональної системи ранжування пріоритетів за критерієм важливості — є чинниками, що мають негативний вплив на технічний стан та ефективність функціонування дорожньої інфраструктури.

Основною метою інформаційного забезпечення дорожньої галузі є формування систематизованого масиву актуальних, комплексних даних щодо автомобільних доріг, інфраструктурних об'єктів, елементів дорожнього сервісу, характеристик транспортних потоків, а також природних і техногенних чинників. Така інформація є критично необхідною для обґрунтованого планування, організації та реалізації заходів, спрямованих на забезпечення максимально ефективного використання наявних фінансових ресурсів у сфері дорожнього господарства.

Процес формування альтернативних варіантів рішень та прийняття обґрунтованого управлінського рішення у сфері дорожнього господарства можливий виключно за наявності комплексної інформації про технічний та експлуатаційний стан автомобільної дороги або мережі доріг. Достовірність такої інформації безпосередньо залежить від об'єктивності та актуальності первинних даних, що використовуються на момент прийняття відповідного рішення.

Метою роботи є аналізування практичних аспектів використання супутникової навігації для обліку довжини автомобільних доріг в Україні на основі сучасних досліджень технологій у галузі.

Виклад основного матеріалу. У 2016–2023 роках Агентством відновлення було реалізовано проєкти із визначення просторових координат мережі міжнародних, національних, регіональних та територіальних автомобільних доріг загального користування державного значення за допомогою GNSS-технологій. Їх використання має ряд особливостей при вимірюванні лінійних об'єктів і потребує певного теоретичного підґрунтя для належного виконання робіт та точності вимірювань.

Супутникова навігація ґрунтується на прийманні сигналів від супутників за допомогою сигналів GNSS/GPS, що транслюються в L-діапазоні (зазвичай це частоти 1–2 ГГц). L-діапазон складається з двох основних частин: нижньої (від 1164 до 1300 МГц) і верхньої (від 1559 до 1610 МГц). Більшість супутникових систем передають свої дані, використовуючи ці дві смуги діапазону.

GPS-приймач отримує сигнали від щонайменше 4 супутників. На основі тривимірної геометрії (довжина, ширина, висота) між супутниками та приймачем, він обчислює матрицю геометричного розташування. З цієї матриці виводиться PDOP — як коефіцієнт, що показує, наскільки геометрія супутників впливає на точність позиції.

PDOP (Position Dilution of Precision) — це просторове погіршення точності, термін, який використовується в супутникових навігаційних системах, таких як GPS. PDOP вимірюється автоматично GPS-приймачем на основі геометричного розташування супутників, які для нього доступні у даний момент часу, його математичний розрахунок базується на координатах супутників і їхньому розташуванні відносно користувача. Він є одним із коефіцієнтів, які оцінюють якість супутникової геометрії: PDOP враховує тривимірне положення: широту, довготу та висоту (характеризує погіршення точності позиції в тривимірному просторі); HDOP — горизонтальне погіршення точності (широта та довгота); VDOP —погіршення точності по вертикалі (висота); GDOP — геометричне погіршення точності (включає час) [1].

Низьке значення PDOP свідчить про необхідну геометрію розташування штучних супутників на середній круговій орбіті Землі, що забезпечує високу точність (рис. 1,а), натомість, високе значення свідчить про скупченість штучних супутників у певному сегменті орбіти Землі, і відповідно, зниження точності (рис. 1,б).

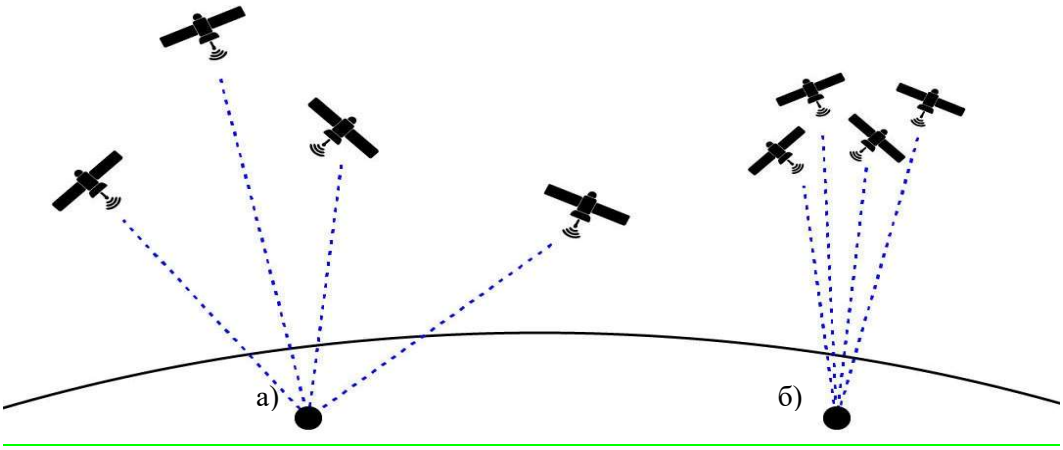


Рисунок 1 – Варіанти розташування штучних супутників на середній круговій орбіті Землі
Figure 1 – Options for the location of artificial satellites in the Earth's medium circular orbit

Значення PDOP залежно від позиціонування штучних супутників можна поділити на такі: 1–2 — при ідеальній геометрії супутників; 2–5 — прийнятне для більшості задач; 5–10 — значно впливає на точність вимірювань; більше 10 — вимірювання ненадійне. Значення PDOP також залежить і від польових умов, наприклад: у відкритому полі, за умови видимості достатньої кількості супутників — ідеальна точність (PDOP < 2); за умови часткового перекриття неба лісовими насадженнями — задовільна точність (PDOP 3–5); за умови високої та щільної міської забудови — незадовільна геометрія супутників, висока похибка (PDOP >6).

У геодезичних GPS-пристроях PDOP постійно відображається на екрані. Наприклад, Trimble, Leica, Topcon — всі показують PDOP у реальному часі. Оператор може встановити поріг PDOP: наприклад, не записувати координати, якщо PDOP > 4. У GIS-програмах (наприклад, ArcGIS, QGIS) можна імпортувати дані з GPS, де PDOP зберігається як атрибут кожної точки.

На PDOP впливає геометрія супутників, їх кількість, атмосферні умови, ефект багатошляховості (Multipath) та дані про орбіти супутників (ефемериди).

Найголовніший фактор — це розташування супутників на небі. Якщо супутники розкидані по всьому небосхилу, PDOP буде низьким, а точність — високою. Якщо супутники згруповані в одному секторі, PDOP зростає, і точність погіршується. Чим більше супутників доступно для приймача, тим точніше визначається положення. Але навіть велика кількість супутників не гарантує низький PDOP, якщо їх геометрія невдала. Іоносфера та тропосфера можуть викривляти GPS-сигнали, змінюючи їх швидкість і напрямок, що викликає рефракцію та впливає на точність розрахунків. Сигнал може відбиватися від будівель, дерев або гір, перш ніж потрапити до приймача, що створює помилкові дані. GPS базується на надточному вимірюванні часу, і якщо годинник супутника має похибку, даний фактор може спричинити помилку в позиціонуванні на кілька метрів.

Для зниження PDOP під час GPS-зйомки і покращення точності позиціонування можна використовувати планувальники супутників (наприклад, GNSS Planning Software), щоб визначити

періоди з низьким PDOP. Більшість професійних GPS-приймачів дозволяють встановити поріг PDOP, при перевищенні якого зйомка не проводиться, що дозволяє уникнути збору неточних даних. Зберігання PDOP як атрибут кожної точки дозволяє відфільтрувати неточні дані при обробці в GIS або CAD-системах.

Високі будівлі, вузькі вулиці, металева інфраструктура — можуть серйозно впливати на PDOP, погіршуючи геометрію супутників і точність GPS. Проте є способи мінімізувати цей вплив шляхом встановлення антени на штатив або дах авто, щоб уникнути екранування сигналу будівлями чи людьми; використання високоякісних антен з круговою діаграмою прийому; налаштування порогового значення PDOP (наприклад, < 4), для автоматичного відхилення запису неточних вимірювання; збір сирих даних (RINEX) і обробляння їх у спеціалізованих програмах, де можна виключити точки з високим PDOP. GPS-приймачі, що працюють лише в L1, порівняно з приймачами L1/L5 в міських умовах, показують, що приймачі L1/L5 забезпечують кращу точність, але лише за наявності багатопроменевих сигналів (рис. 2) [2]. При цьому L1/L5 забезпечує більшу стійкість до багатопроменевих завад, що підвищує надійність і стабільність навігації, особливо в умовах щільної міської забудови.



Рисунок 2 – Якість даних за умови використання GPS-приймача однодіапазонного L1 (помаранчевий) та дводіапазонного L1/L5 (зелений)

Figure 2 – Data quality when using a single-band L1 (orange) and dual-band L1/L5 (green) GPS receiver

З метою вдосконалення інформаційного забезпечення дорожньої галузі, Агентством відновлення впродовж 2009-2018 років було впроваджено низку галузевих стандартів [4-6]. На їхній основі, базуючись на досвіді виконання робіт з паспортизації та визначення просторових даних автомобільних доріг у 2016- 2024 роках було розроблено і прийнято наказом від 09.07.2025 № 119

серію національних стандартів з наданням чинності з 01.12.2025, які регламентують функціонування Єдиної бази даних автомобільних доріг України (ЄБД) [7-9]. Вона забезпечує централізоване електронне збирання, зберігання та обробку інформації щодо автомобільних доріг загального користування державного значення та їх складових об'єктів. Це, у свою чергу, створює передумови для автоматизованого формування статистичних розрізів, необхідних для управлінських та аналітичних цілей.

Довжина певної ділянки дороги визначається як сума відстаней між суміжними точками осі крайової смуги прямого напрямку руху, для яких були визначені просторові координати. Відстань між двома суміжними точками розраховується за формулою:

$$l_{(i-j)} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2)} \quad (1)$$

де:

$l_{(i-j)}$ – відстань між та точками, м;

X_i , Y_i , Z_i – просторові координати i – точки;

X_j , Y_j , Z_j – просторові координати j – точки.

Розрахунки довжин ведуться у метровому вимірі, з трьома значущими цифрами після коми.

Проїзна частина автомобільної дороги складається з:

— основних смуг руху з додатковими смугами руху на підйомах;

— з'їздів транспортних розв'язок.

Однією з особливостей перевірки даних за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення [10], було згладжування висотних відміток шляхом спрямлення послідовних трійок вузлів на ділянках доріг з недопустимою рівністю. Дана функція дійсна лише для відміток повздовжнього профілю та є доцільною при обробці даних знімання дороги з недопустимою рівністю, коли реальні відмітки приховують тренд повздовжніх похилів, що був закладений проектом дороги. У випадку коли стан дороги задовільний, при масовому вживанні цієї функції можливо втратити дійсні екстремальні точки перелому поверхні дороги — на вершинах опуклих та увігнутих вертикальних кривих, місця просадок покриття на трубах, небезпечні та недопустимі перелами повздовжнього профілю при в'їзді на мостові споруди.

Розрахунок відміток при згладжування вузлів проводиться за формулою:

$$H_{i+1} = H_i + (\frac{H_{i+2} - H_i}{KM +_{i+2} - KM +_i} \times (KM +_{i+1} - KM +_i)) \quad (2)$$

де:

$KM +_{i+1}$ – лінійна прив'язка шуканого вузла, м;

H_{i+1} – висотна відмітка шуканого вузла, м.

Алгоритм розрахунків згладжування висотних відміток шляхом спрямлення послідовних трійок вузлів полягає в циклічному рішенні формули (2) для послідовних трійок вузлів заданої ділянки просторових координат автомобільної дороги.

В рамках робіт з узагальнення інформації щодо просторових координат автомобільних доріг державного значення [11, 12], була проведена глобальна перевірка отриманих результатів, зведення їх

у єдину мережу за принципом просторової полігонометрії, з подальшим узгодженням меж між областями. В процесі робіт були визначені просторові координати осей правих проїздів прямого та зворотного напрямків руху для автомобільних доріг міжнародного значення — 9 197,11 км, національного — 7 277,14 км, регіонального — 9 477,14, територіального — 19 745,37 км та з'їздів їх транспортних розв'язок в одному та декількох рівнях.

Зібрані та перевірені просторові дані було використано для створення просторової основи (рис.3), яка дозволить точно локалізувати та систематизувати всю інформацію про дорожню інфраструктуру та транспортні потоки, та відкриє доступ до ряду можливостей для реалізації потреб, а саме:

— власникам автомобільних доріг — для забезпечення більшої точності у зборі, систематизації та аналізі інформації про дорожню мережу, її об'єкти та споруди, транспортні потоки й події; а також для публічного розкриття відповідних даних;

— учасникам дорожнього руху — з метою точного визначення власного місцезнаходження відносно дороги, особливо у випадках, коли необхідно оперативно повідомити про нього екстреним службам через голосовий зв'язок, наприклад, при ДТП;

— екстреним службам — для ефективного опрацювання звернень громадян, планування маршрутів реагування та забезпечення оперативності дій;

— громадським організаціям — для аналізу звітної інформації щодо технічного стану автомобільних доріг та виконаних ремонтних робіт, яку надають балансоутримувачі.

—

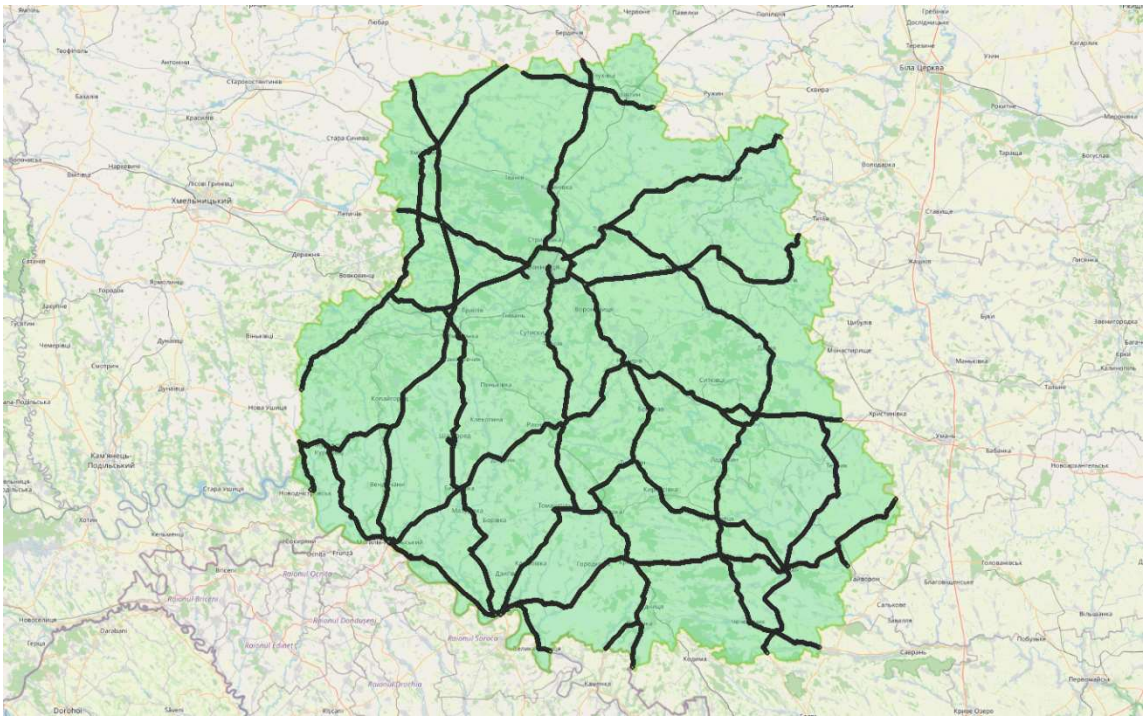


Рисунок 3 – Візуалізація просторових даних автомобільних доріг зібраних GPS-приймачами у межах Вінницької області

Figure 3 – Visualization of spatial data of roads collected by GPS receivers within Vinnytsia region

За результатами виконання роботи було розроблено методичні рекомендації розроблені для розрахунку облікової довжини автомобільних доріг загального користування в односмуговому обчисленні [13], призначені для використання у статистичній звітності про мережу автомобільних доріг загального користування і при плануванні видатків на дорожні роботи [14]. Довжина автомобільної дороги, визначена як сума довжин:

— кожної основної смуги в прямому та зворотному напрямкам руху, додаткових смуг на підйомах, (в тому числі для підходів та обходів населених пунктів);

— зовнішніх та внутрішніх перехідно-швидкісних смуг;

— кожної смуги руху з'їздів транспортних розв'язок в різних або в одному рівні.

Рекомендації призначені для використання при веденні статистичної звітності. У них наведені приклади визначення початку/кінця окремих елементів автомобільної дороги для правильного розрахунку довжини цих елементів в односмуговому обчисленні. Наведені схеми для можливості встановлення точної довжини транспортних розв'язок в одному (рис. 4) та різних рівнях, додаткових смуг руху, перехідно-швидкісних смуг тощо. Це допоможе забезпечити встановлення обсягів робіт з визначення транспортно-експлуатаційних характеристик автомобільних доріг (рівність, міцність, коефіцієнт зчеплення), обсягів нового будівництва, реконструкції, ремонтів та експлуатаційного утримання автомобільних доріг. А також, стимулювати запровадження механізмів, які сприятимуть раціональному плануванню державних видатків на нове будівництво, реконструкцію, ремонти та експлуатаційне утримання автомобільних доріг.

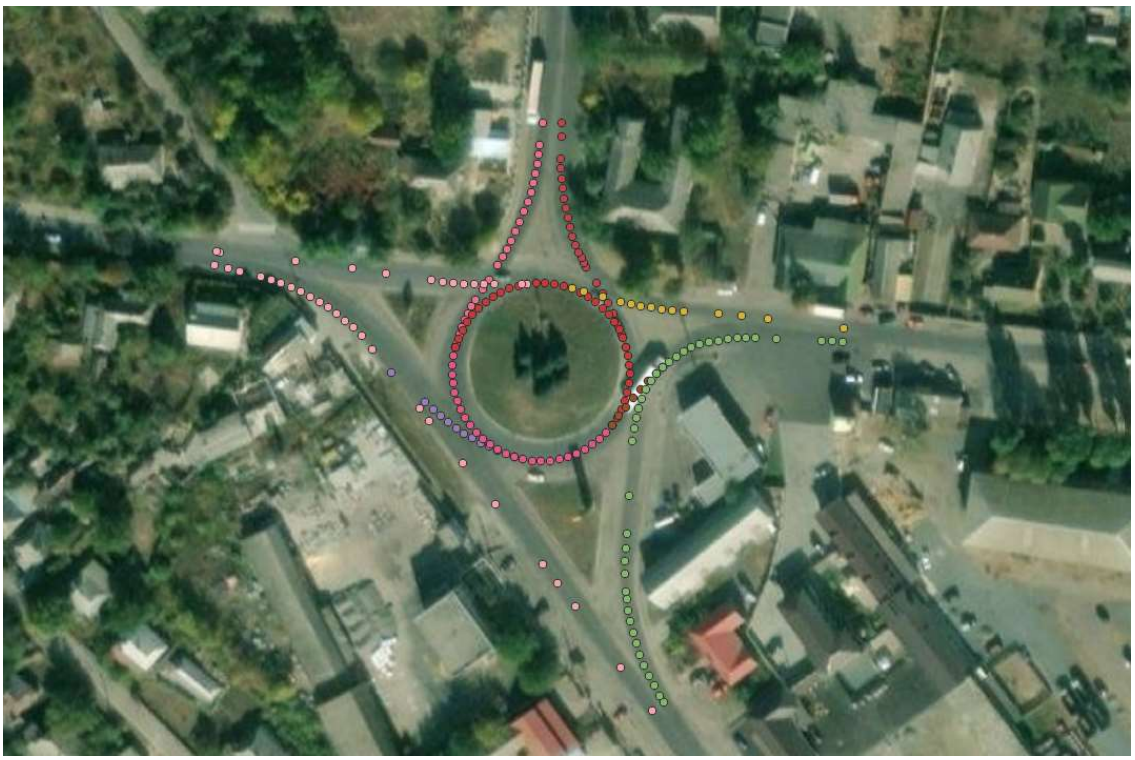


Рисунок 4 – Візуалізація просторових даних з’їздів транспортної розв’язки типу «кільце» автомобільних доріг

Figure 4 – Visualization of spatial data of road junction exits of the «ring» type

Першочергове створення цифрової моделі мережі автомобільних доріг згідно п. 6.2.2 [6] відбувалося шляхом визначення просторових координат осей правих проїздів прямого та зворотного напрямків руху [11, 12]. Оцінка точності отриманих результатів була здійснена при порівнянні результатів паспортизації автомобільної дороги М-05 Київ – Одеса в межах Київської області у 2024 році [15]. Таким чином, для прямого напрямку руху було отримано похибку у 1,831 м, а для зворотного напрямку руху — 1,974 м, на ділянці довжиною 75 243,280 м у порівнянні з даним визначення просторових координат осей правих проїздів прямого та зворотного напрямків руху 2016 – 2023 років. Що свідчить про загальну похибку вимірювань на даній ділянці у відсотковому співвідношенні — 0,0026 %.

У світовій практиці дуже широко використовуються різноманітні інтелектуальні транспортні системи, вони вирішують велику кількість різноманітних проблем від упорядкування трафіку, зняття вартості за проїзд, до виділення місць для паркування та цифрової ідентифікації. Просторові дані полегшують формування матриць зв'язків та матриць відстаней, алгоритмів нарахування пробігу вантажних транспортних засобів для системи справляння плати за проїзд автомобільними дорогами та інших систем [16].

На сучасному етапі розвитку дорожньо-транспортної інфраструктури України спостерігається високий рівень теоретичної та методологічної готовності галузі до широкомасштабного впровадження системи інформаційного забезпечення управління дорожнім господарством. Зазначена система має потенціал стати ключовим інструментом у процесі прийняття обґрунтованих управлінських рішень, що стосуються експлуатаційного утримання, планування ремонтних заходів та стратегічного розвитку мережі автомобільних доріг. Її інтеграція у практику управління дозволить суттєво підвищити ефективність використання матеріальних і фінансових ресурсів, оптимізувати процеси технічного обслуговування та сприяти формуванню довгострокових програм розвитку транспортної інфраструктури.

Висновки

Визначені, перевірені та систематизовані дані просторових координат осей правих проїздів прямого та зворотного напрямків руху автомобільних доріг дозволили здійснити облік їх довжини та систематизувати у базі даних: для доріг міжнародного значення — 9 197,11 км, національного — 7 277,14 км, регіонального — 9 477,14, територіального — 19 745,37 км та з'їздів їх транспортних розв'язок в одному та декількох рівнях. Однак, їх повний облік у односмуговому обчисленні можливий лише при повноцінному виконанні робіт з паспортизації автомобільних доріг, що є тривалим та ресурсоємним процесом.

Оцінка точності отриманих результатів була здійснена порівнянням з результатами паспортизації автомобільної дороги М-05 Київ – Одеса в межах Київської області у 2024 році. Таким чином, для прямого напрямку руху було отримано похибку у 1,831 м, а для зворотного напрямку руху — 1,974 м, на ділянці довжиною 75 243,280 м. Що свідчить про загальну похибку вимірювань на даній ділянці у відсотковому співвідношенні — 0,0026 %.

У сучасних умовах розвитку дорожньої галузі України, впровадження цифрових моделей дорожньої мережі, геоінформаційних систем та інтелектуальних транспортних технологій є стратегічно необхідним кроком для забезпечення ефективного управління інфраструктурою, раціонального використання ресурсів і формування обґрунтованих рішень щодо утримання, ремонту та розвитку автомобільних доріг, незважаючи на фінансові обмеження, зумовлені воєнним станом.

Перелік посилань

1. Точність GPS: HDOP, PDOP, GDOP . Режим доступу: https://gisgeography.com/gps-accuracy-hdop-pdop-gdop-multipath/.

2. Сучасні GNSS/GPS діапазони: перехід від односмугових до двосмугових. Режим доступу: https://www.chipnews.com.ua/userfiles/file/2-2024%20CHIP%20NEWS/26-31%20pages%20from%20Chip News_UA_02-2024.pdf.

3. Корощенко, М. М., Корніюк, В. Я. (2023). Точність визначення навігаційних параметрів та безпека кораблеводіння. Морська безпека та оборона, (2), 92-98. https://doi.org/10.32782/msd/2023.2.14.

4. СОУ 42.1-37641918-038:2016 Паспорт автомобільної дороги (зі Зміною №1).

5. СОУ 42.1-37641918-063:2016 Геоінформаційна система автомобільних доріг Вимоги до складу, змісту та застосування.

6. СОУ 42.1-37641918-122:2014 Автомобільні дороги. Вимоги до комплексу робіт з інформаційного забезпечення (зі Зміною №1).

7. ДСТУ 9332-1:2025 «Геоінформаційна система автомобільних доріг загального користування. Частина 1. Склад, зміст та вимоги до наборів даних».

8. ДСТУ 9332-2:2025 «Геоінформаційна система автомобільних доріг загального користування. Частина 2. Вимоги до збирання даних».

9. ДСТУ 9332-3:2025 «Геоінформаційна система автомобільних доріг загального користування. Частина 3. Вимоги до відображень».

10. Дуля М.В. Розроблення програмного модуля для перевірки та коригування просторових координат автомобільних доріг. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Київ, 2024. Вип. 115. Частина 2. С. 180–189.

11. Іванченко В.О., Дуля М.В. та ін. Звіт про науково-дослідну роботу «Узагальнити інформацію щодо просторових координат автомобільних доріг державного значення та розробити базу даних географічних координат з ув’язкою їх в єдину мережу для уточнення протяжності і кілометрової прив’язки», Київ: ДерждорНДІ, 2021, 102 с.

12. Дуля М.В. Гресько І.Л. та ін. Звіт про науково-дослідну роботу «Узагальнити інформацію щодо просторових координат територіальних автомобільних доріг державного значення та доповнити базу даних географічних координат з ув’язкою їх в єдину мережу для уточнення протяжності і кілометрової прив'язки», Київ: ДерждорНДІ, 2023, 84 с.

13. МР А.2.1-37641918-904:2019 Методичні рекомендації з обліку довжини автомобільних доріг загального користування в односмуговому обчисленні.

14. Усиченко О. Ю., Дуля М. В. Запровадження національної системи обліку довжини автомобільних доріг в односмуговому обчисленні. Дороги і мости. Київ, 2024. Вип. 29. С. 139–147.

15. Вознюк А. Б., Дуля М. В. Практичні аспекти перевіряння та аналізування наборів геопросторових даних про автомобільні дороги загального користування. Дороги і мости. Київ, 2025. Вип. 31. С. 149–162.

16. Гуков М. І., Дуля М. В. До проблеми визначення пройденого шляху для розрахування плати за проїзд автомобільними дорогами. Дороги і мости. Київ, 2024. Вип. 30. С. 264–272.

17. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво.

18. ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів.

19. Геодані про дороги державного значення тепер доступні у відкритому доступі та у зручному форматі. Режим доступу: https://www.facebook.com/agency.for.restoration/posts/pfbid02odALAr2phAGASSvxi3mAZ8G6Uf6b6vUkLc3cpsZjPKBdhacYEdhQqoC9E7FQ23dXl.

20. Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних».

21. Закон України «Про захист інформації в автоматизованих системах».

PRACTICAL ASPECTS OF USING SATELLITE NAVIGATION TO MEASURE THE LENGTH OF PUBLIC ROADS

Slavinska Olena S., Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Professor of the department of Transport construction and property management,
e-mail: elenaslavin9@gmail.com, tel.: +380509698109, http://orcid.org/0000-0002-9709-0078

Dulia Mykhailo V., State enterprise «National Institute for Development of Infrastructure (SE «NIDI»), Junior Researcher Fellow at the Digitalization Development Devision , Kyiv, Ukraine,
e-mail: mykhailo_dulia@gmail.com, tel.+380939203254, https://orcid.org/0000-0002-1916-8642.

Summary. The article discusses topical issues of information support for the road industry in Ukraine in the context of digitalization and the introduction of geographic information systems. The lack of reliable data on the road network, traffic characteristics, alternative solutions, and their consequences negatively affects the efficiency of road infrastructure. The main goal is to create a method for accounting for motorways based on a systematized database of relevant spatial data, which allows for the rational planning of measures for the maintenance, repair, and development of the road network.

The use of GNSS (Global Navigation Satellite System) technologies allows for the accurate determination of the spatial coordinates of road objects, and the PDOP (Position Dilution of Precision) coefficient is a critical indicator of positioning accuracy when working with linear objects. The variability of PDOP values depending on the geometry of satellites and field conditions is considered, and methods for reducing errors in GPS surveying are described.

Special attention is paid to methodological recommendations for calculating the accounting length of motorways and developing a digital model of the road network to create the prerequisites for the integration of intelligent transport systems, which are widely used in global practice to optimise traffic, collect tolls, manage parking, etc.

Despite the high level of theoretical readiness of the industry, the implementation of these measures is complicated by limited funding due to the state of war. At the same time, the introduction of digital solutions is strategically important for ensuring effective road management in the long term.

Keywords: highway, length measurement, satellite navigation, coordinate plane, linear reference, spatial data, error, digital model.

References

1. GPS accuracy: HDOP, PDOP, GDOP. Access mode: https://gisgeography.com/gps-accuracy-hdop-pdop-gdop-multipath/.

2. Modern GNSS/GPS bands: transition from single-band to dual-band. Access mode: https://www.chipnews.com.ua/userfiles/file/2-2024%20CHIP%20NEWS/26-31%20pages%20from%20ChipNews_UA_02-2024.pdf.

3. Koroshchenko, M. M., Korniuk, V. Ya. (2023). Accuracy of navigation parameter determination and navigation safety. Maritime Safety and Defense, (2), 92-98. https://doi.org/10.32782/msd/2023.2.14.

4. SOU 42.1-37641918-038:2016 Motorway passport (with Amendment No. 1).

5. SOU 42.1-37641918-063:2016 Geoinformation system for motorways. Requirements for composition, content, and application.

6. SOU 42.1-37641918-122:2014 Motorways. Requirements for the complex of works on information support (with Amendment No. 1).

7. DSTU 9332-1:2025 "Geographic information system of public motorways. Part 1. Composition, content, and requirements for data sets."

8. DSTU 9332-2:2025 “Geographic information system for public roads. Part 2. Requirements for data collection.”

9. DSTU 9332-3:2025 “Geographic information system for public roads. Part 3. Requirements for displays.”

10. Dulia M.V. Development of a software module for checking and correcting the spatial coordinates of motorways. Motorways and road construction. Kyiv, 2024. Issue 115. Part 2. pp. 180–189.

11. Ivanchenko V.O., Dulia M.V. et al. Report on the research work "Generalize information on spatial coordinates of roads of state importance and develop a database of geographical coordinates with their linking into a single network to clarify the length and kilometer reference", Kyiv: "DerzhdorNDI", 2021, 102 p.

12. Dulia M.V., Hresko I.L., et al. Report on research work “Summarize information on the spatial coordinates of territorial motorways of national importance and supplement the database of geographical coordinates by linking them into a single network to clarify the length and kilometer reference,” Kyiv: DerzhdorNDI, 2023, 84 p.

13. MR A.2.1-37641918-904:2019 Methodical recommendations for accounting the length of public roads in single-lane calculation.

14. Usychenko O. Yu., Dulia M. V. Introduction of a national system for recording the length of motorways in single-lane calculation. Roads and Bridges. Kyiv, 2024. Issue 29. Pp. 139–147.

15. Voznyuk A. B., Dulia M. V. Practical aspects of checking and analyzing geospatial data sets on public roads. Roads and Bridges. Kyiv, 2025. Issue 31. Pp. 149–162.

16. Gukov M. I., Dulia M. V. On the problem of determining the distance traveled for calculating tolls on public roads. Roads and Bridges. Kyiv, 2024. Issue 30. Pp. 264–272.

17. DBN V.2.3-4:2015 Public Roads. Part I. Design. Part II. Construction.

18. DBN V.2.3-5:2018 Streets and roads in populated areas.

19. Geodata on roads of national importance is now available in open access and in a convenient format. Access mode: https://www.facebook.com /agency.for.restoration/posts/pfbid02odALAr2phAGASSvxi3mAZ8G6Uf6b6vUkLc3cpsZjPKBdhacYEdhQqoC9E7FQ23dXl.

20. Law of Ukraine “On National Geospatial Data Infrastructure.”

21. Law of Ukraine “On Information Protection in Automated Systems.”

УДК 625.7/.8 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-181-190**
UDC 625.7/.8

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ НАНЕСЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ДОРОЖНЬОЇ РОЗМІТКИ

ANALYSIS OF HORIZONTAL ROAD MARKING TECHNOLOGIES



Стьожка Віталій Володимирович, *кандидат технічних наук, доцент, кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e- mail: styozhka@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0002-5039-9852



Шнайдер Михайло Ігорович, *аспірант, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: misha.shnayder@ukr.net,*

https://orcid.org/0000-0001-7788-1158

Анотація: Для того, щоб зрозуміти структуру типів, виробників, способів нанесення горизонтальної дорожньої розмітки у загальній кількості маркувальних машин в Україні, було прийнято рішення виконати аналіз відкритих торгів (тендерів), інформація про які розміщена у відкритому доступі. Слід зазначити, що найбільші обсяги горизонтальної дорожньої розмітки влаштовуються на автомобільних дорогах загального користування та у великих населених пунктах. Якщо розглядати автомобільні дороги загального користування, то основний об'єм нанесення горизонтальної дорожньої розмітки припадає на дороги державного значення, оскільки дороги місцевого значення не мають подекуди твердого покриву. З цієї причини, під час проведення аналізу, було взято до уваги саме дороги державного значення.

У результаті, проаналізовано 110 державних закупівель у 20 областях нашої країни, які відбулися в проміжку з 2023 року по 2024 рік. Дослідження проводилось із використанням електронної системи державних закупівель «*Prozorro*». До вищенаведеної кількості проаналізованих закупівель з експлуатаційного утримання автомобільних доріг входили ті закупівлі, які містили інформацію про надання послуг з нанесення горизонтально дорожньої розмітки. Під час проведення дослідження, була використана інформація про механізми (техніку), що застосовуються для нанесення дорожньої розмітки та наведена у документах переможців торгів, з якими були підписані договори.

Ключові слова: горизонтальна дорожня розмітка, пластик гарячого нанесення, пластик холодного нанесення, причіпна маркувальна машина, ручна маркувальна машина, самохідна маркувальна машина, спосіб нанесення фарби, спрей-пластик, фарба дорожня.

Вступ. Основне призначення горизонтальної дорожньої розмітки – організація дорожнього руху шляхом забезпечення візуального орієнтування водіїв під час вибору напрямку й режимів переміщення за різних дорожніх умов; інформування та попередження про небезпеку й умови руху; позначення ділянок для перетину проїзної частини пішоходами та велосипедистами [1].

У зв'язку із постійним розвитком і вдосконаленням існуючих технологій нанесення горизонтальної дорожньої розмітки, існує широкий ряд як матеріалів для виконання таких видів робіт (фарби акрилові, фарби полімерні одно- та двокомпонентні; спрей-пластики та пластики холодного нанесення; пластики гарячого нанесення та ін.), так і технічних засобів для їх нанесення на покрив дорожнього одягу.

Такий широкий ряд матеріалів і техніки дозволяє з урахуванням фактичних умов визначатися із технологічними підходами до виконання робіт із нанесення горизонтальної дорожньої розмітки.

Враховуючи зміст [1], залежно від призначення, горизонтальну розмітку поділяють на:

- постійну: матеріалами з меншою та з більшою функціональною довговічністю [1];
- тимчасову: у місцях проведення дорожніх робіт згідно з [2]; у разі оперативної зміни в організації дорожнього руху, пов’язаної з забезпеченням безпеки руху; у разі проведення спеціальних заходів.

Мета роботи. Провести аналіз ринку України щодо наявних різновидів і типів маркувальних машин для нанесення горизонтальної дорожньої розмітки. Встановити технологічні підходи коли, як та для чого обирають той чи інший спосіб нанесення розмічальних матеріалів для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки, що застосовуються з метою забезпечення та підвищення безпеки дорожнього руху. Встановити найбільш поширені марки, моделі та типи маркувальних машин, а також способи нанесення розмічальних матеріалів для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки на території України.

Виклад основного матеріалу. Нанесення розмітки фарбами [3] є сьогодні найбільш поширеним та виправданим, враховуючи низькі темпи будівництва, реконструкції, ремонтів та фактичний стан дорожньої мережі, а також складність ефективного управління ремонтами та утриманням, з метою запобігання виникнення руйнувань на дорогах великої протяжності [4].

За останні два десятиліття, державний стандарт з вимогами до горизонтальної дорожньої розмітки [1] змінювався декілька разів, особливо у частині вимог до її функціональної довговічності.

Таблиця 1 – Марки та моделі машин для нанесення горизонтальної розмітки фарбами дорожніми за способом нанесення матеріалу

Table 1 – Brands and models of machines for applying horizontal road markings with road paints according to the method of material application

Спосіб нанесення	Марка та модель машини	Тип машини
1	2	3
Безповітряний	Шмель 11-А, Муравей 600, ДЕ-21, Graco Line Driver, Hofmann H75-1000, Hofmann H37, H36-2000P, Hofmann H36, Hofmann H33-3, Hofmann H25-4, Hofmann H18-1, Hofmann H11-1	Самохідна
	Graco LineLazer, Graco RoadLazer, Graco RoadLazer RoadPak	Причіпна
	Hofmann H9, Hofmann RM50H, Hofmann H8-1, Graco LineLazer	Ручна
Повітряний	Grun THERMOZET, Hofmann H33-3, Hofmann H26-3, Hofmann H18-1, Hofmann H16-3, Hofmann H9	Самохідна
	Grun City, Hofmann H5-1	Ручна

У документі 1994 року [5] вимоги до функціональної довговічності розмітки не було встановлено взагалі. Однак, уже в стандарті 2007 року [6] визначено, що функціональна довговічність розмітки, яка влаштована на гарячому дрібнозернистому асфальтобетоні чи цементобетонні фарбами, повинна становити не менше 8 місяців.

Редакція 2010 року [7] мала вимогу, що, у разі нанесення постійної горизонтальної дорожньої розмітки, матеріали, що застосовуються, мають відповідати термінам зносостійкості не менше ніж шість місяців для фарб.

Починаючи з 2021 року, вступив у дію оновлений (чинний) державний стандарт [1], в якому наведені вимоги до функціональної довговічності постійної горизонтальної поздовжньої дорожньої розмітки залежно від рівня навантаження на неї. Для розмітки, що нанесена фарбами, функціональна довговічність має бути від 5 до 12 місяців.

Відповідно до [8], машини для нанесення горизонтальної розмітки за способом нанесення матеріалу на покрив дорожнього одягу класифікують наступним чином (табл. 1).

Чинна нормативна документація [8], а також наявні на світовому та українському ринку машини для нанесення горизонтальної розмітки передбачають два способи нанесення фарб дорожніх на покрив дорожнього одягу, а саме:

- безповітряний метод нанесення розмітки – спосіб нанесення фарби на дорожній покрив шляхом подачі матеріалу через спеціальні форсунки під високим тиском за рахунок гідравлічного стискання, яке утворюється гідронасосом або пневмонасосом;
- повітряний метод нанесення розмітки – спосіб нанесення фарби на дорожній покрив шляхом подачі матеріалу через спеціальні форсунки під тиском повітря, яке утворюється компресором, з утворенням аерозольного факелу на виході із форсунки.

Поряд із фарбами для горизонтальної розмітки автомобільних доріг, також застосовуються й інші матеріали для нанесення, такі як пластик гарячого нанесення, пластик холодного нанесення та спрей-пластик, полімерні стрічки. Ці матеріали дозволяють влаштовувати горизонтальну розмітку суцільним шаром, структурою (структурна розмітка) та відповідним профілем (профільна розмітка):

- профільна розмітка – горизонтальна дорожня розмітка із термопластиків або холодних пластиків, яка використовується для покращення видимості в темну пору доби при наявності вологи на покриві, нанесена суцільним шаром, який має періодичні виступи або інші, спеціально утворенні нерівності, що створюють шумовий ефект при великій висоті виступів;
- структурна розмітка – горизонтальна дорожня розмітка із термопластиків або холодних пластиків, нанесена не суцільним шаром, а окремими фрагментами (каплями тощо) в межах заданої ширини лінії, призначена для покращення видимості в темну пору доби при наявності вологи на покриві.

Для того, щоб зрозуміти структуру типів, виробників, способів нанесення горизонтальної дорожньої розмітки у загальній кількості маркувальних машин в Україні, було прийнято рішення виконати аналіз відкритих торгів (тендерів), інформація про які розміщена у відкритому доступі. Слід зазначити, що найбільші обсяги горизонтальної дорожньої розмітки влаштовуються на автомобільних дорогах загального користування та у великих населених пунктах. Якщо розглядати автомобільні дороги загального користування, то основний об’єм нанесення горизонтальної дорожньої розмітки припадає на дороги державного значення, оскільки дороги місцевого значення не мають подекуди твердого покриву. З цієї причини, під час проведення аналізу, було взято до уваги саме дороги державного значення.

У результаті, проаналізовано 110 державних закупівель у 20 областях нашої країни, які відбулися в проміжку з 2023 року по 2024 рік. Дослідження проводилось із використанням електронної системи державних закупівель «*Prozorro*». До вищенаведеної кількості проаналізованих закупівель з експлуатаційного утримання автомобільних доріг входили ті закупівлі, які містили інформацію про надання послуг з нанесення горизонтально дорожньої розмітки. Під час проведення дослідження, була використана інформація про механізми (техніку), що застосовуються для нанесення дорожньої

розмітки та наведена у документах переможців торгів, з якими були підписані договори. Результати аналізу наведено на рис. 1–2.

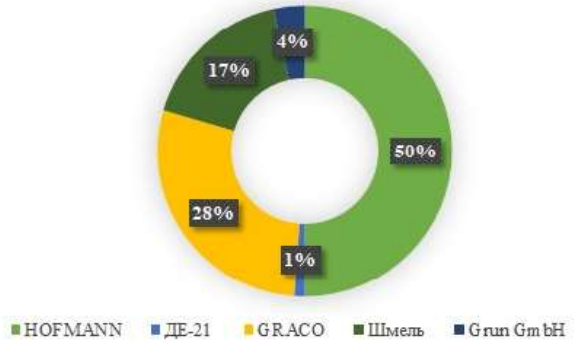


Рисунок 1 – Марки маркувальних машин із безповітряним способом нанесення розмічальних матеріалів

Figure 1 – Brands of marking machines with an airless method of applying marking materials

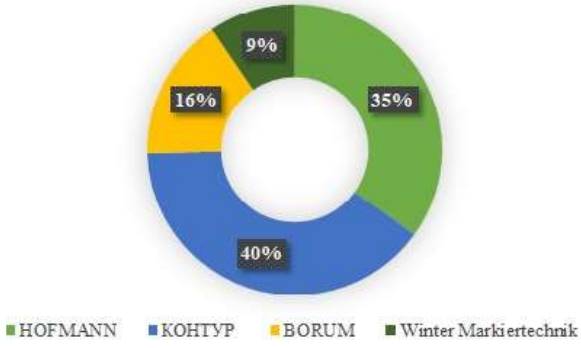


Рисунок 2 – Марки маркувальних машин із повітряним способом нанесення розмічальних матеріалів

Figure 2 – Brands of marking machines with air-based application of marking materials

Із результатів аналізу, можна виділити два виробника, маркувальні машини яких є найбільш застосовуваними в дорожній галузі України, а саме: компанія GRACO Inc. та компанія HOFMANN GmbH.

Починаючи з 1952 року [9], компанія HOFMANN GmbH є виробником в області техніки для дорожньої розмітки. Асортимент технологічних засобів, який виготовляє ця компанія, включає все, що є необхідним для влаштування дорожньої розмітки – від невеликих машин з ручним управлінням до вантажівок-маркувальників. У табл. 2-3 наведені основні маркувальні машини даного виробника, в залежності від їхнього типу та застосовуваного розмічального матеріалу.

Таблиця 2 – Маркувальні машини компанії HOFMANN GmbH для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки фарбами дорожніми

Table 2 – Marking machines manufactured by HOFMANN GmbH for applying horizontal road markings with road paints

Спосіб нанесення	Марка та модель машини	Тип машини
1	2	3
Безповітряний	Hofmann H75-1000, Hofmann H37, H36-2000P, Hofmann H36, Hofmann H33-3, Hofmann H25-4, Hofmann H18-1, Hofmann H11-1	Самохідна
	Відсутні	Причіпна
	Hofmann H9, Hofmann RM50H, Hofmann H8-1	Ручна
Повітряний	Hofmann H33-3, Hofmann H26-3, Hofmann H18-1, Hofmann H16-3, Hofmann H9	Самохідна
	Hofmann H5-1	Ручна

Таблиця 3 – Маркувальні машини компанії HOFMANN GmbH для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки спрей-пластиками, пластиками гарячого та холодного нанесення

Table 3 – Marking machines manufactured by HOFMANN GmbH for applying horizontal road markings with spray plastics, hot and cold plastics

Матеріал	Марка та модель машини	Тип машини
1	2	3
Спрей-пластик	Hofmann H37, Hofmann H33-3, Hofmann H26-3	Самохідна
	Hofmann H8-1	Ручна
Пластик гарячого нанесення	Hofmann H75-1000, Hofmann H75-1500, Hofmann H75-3000, Hofmann H26-3	Самохідна
	Hofmann RP100-1H, Hofmann RP30	Ручна
Пластик холодного нанесення	Hofmann H18-1, Hofmann H16-3	Самохідна
	Hofmann 2K50A, Hofmann 2K60A	Ручна

Приклади маркувальних машин компанії HOFMANN GmbH для влаштування розмітки фарбами дорожніми наведено на рис. 3–4 [9].



Рисунок 3 – Самохідна маркувальна машина Hofmann H36-2000P на базі вантажного автомобіля

Figure 3 – Hofmann H36-2000P self-propelled marking machine based on a truck



Рисунок 4 – Ручна маркувальна машина Hofmann H9

Figure 4 – Hofmann H9 manual marking machine

Приклади маркувальних машин компанії HOFMANN GmbH для влаштування розмітки пластиками холодного нанесення наведено на рис. 5–6.



Рисунок 5 – Самохідна маркувальна машина Hofmann H18-1

Figure 5 – Hofmann H18-1 self-propelled marking machine



Рисунок 6 – Ручна маркувальна машина Hofmann 2K50A

Figure 6 – Manual marking machine Hofmann 2K50A

Компанія GRACO Inc. [10] почала своє існування у 1926 році. Дана компанія відноситься до виробників систем і компонентів для роботи з рідинами різної відносної густини. Продукція цієї компанії застосовується для транспортування (перекачування), вимірювання, контролю, дозування, розпилення різних рідин і в'язких матеріалів, що використовуються в різних галузях промисловості та на транспорті. Одним із напрямків виробництва компанії GRACO Inc. є спеціалізована техніка для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки різними розмічальними матеріалами та способами нанесення. У табл. 4-5 наведені маркувальні машини в залежності від їхнього типу та застосовуваного розмічального матеріалу.

Таблиця 4 – Маркувальні машини компанії GRACO Inc. для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки фарбами дорожніми

Table 4 – Marking machines manufactured by GRACO Inc. for applying horizontal road markings with road paints

Спосіб нанесення	Марка та модель машини	Тип машини
1	2	3
Безповітряний	RoadLazer RoadPak, LineLazer V 250SPS HP, LineLazer V 250DC HP	Самохідна
	RoadLazer	Причіпна
	LineLazer V 5900, LineLazer 3400, LineLazer 130HS, LineLazer V 3900, LineLazer 200HS, LineLazer V 200HS HP, LineLazer V 200DC, LineLazer V 200DC HP	Ручна
Повітряний	Відсутні	Самохідна
	Відсутні	Ручна

Таблиця 5 – Маркувальні машини компанії GRACO Inc., що розроблені для влаштування горизонтальної дорожньої розмітки спрей-пластиками та пластиками гарячого і холодного нанесення

Table 5 – Marking machines manufactured by GRACO Inc. for applying horizontal road markings with spray plastics, hot and cold plastics

Матеріал	Марка та модель машини	Тип машини
1	2	3
Спрей-пластик	LineLazer V 250MMA 98:2	Самохідна
	Відсутні	Ручна
Пластик гарячого нанесення	ThermoLazer 300TC + LineDriver, ThermoLazer ProMelt + LineDriver	Самохідна
	ThermoLazer 200TC, ThermoLazer 300TC, ThermoLazer ProMelt	Ручна
Пластик холодного нанесення	Line Lazer 200HS Plastics + LineDriver	Самохідна
	Line Lazer 200HS Plastics	Ручна

Приклади маркувальних машин компанії GRACO Inc. для влаштування розмітки фарбами дорожніми, наведено на рис. 7–8 [10].



Рисунок 7 – Причіпна маркувальна машина Graco RoadLazer
Figure 7 – Graco RoadLazer trailer-mounted marking machine



Рисунок 8 – Ручна маркувальна машина Graco LineLazer IV 5900
Figure 8 – Manual Marking Machine Graco LineLazer IV 590

Приклади маркувальних машин компанії GRACO Inc. для влаштування розмітки пластиками гарячого нанесення, наведено на рис. 9–10 [10].



Рисунок 9 – Самохідна маркувальна машина Graco ThermoLazer 300TC + LineDriver
Figure 9 – Graco ThermoLazer 300TC + LineDriver self-propelled marking machine



Рисунок 10 – Ручна маркувальна машина Graco ThermoLazer
Figure 10 – Graco ThermoLazer Manual Marking Machine

Таблиця 6 – Переваги та недоліки маркувальних машин в залежності від їхнього типу
Table 6 – Advantages and disadvantages of marking machines depending on their type

Тип машини	Переваги	Недоліки
1	2	3
Самохідна	Висока продуктивність; виконує роботу своїм ходом; висока якість за рахунок мінімізації впливу людського фактору	Низька маневреність; складність у перебазуванні (транспортуванні)
Причіпна	Висока продуктивність; висока якість за рахунок мінімізації впливу людського фактору	Потрібне окреме авто, на яке встановлюється обладнання; низька маневреність
Ручна	Маневреність у міських умовах; легкість у перебазуванні (транспортуванні)	Низька продуктивність; нестабільність в якості за рахунок впливу людського фактору

Досвід влаштування горизонтальної дорожньої розмітки свідчить про те, що самохідні та причіпні маркувальні машини, в залежності від їхніх габаритів (на базі вантажного автомобіля, самохідні, причіпні), застосовуються в основному при влаштуванні поздовжньої горизонтальної дорожньої розмітки на автомобільних дорогах загального користування, міських вулицях та дорогах. Що стосується ручних маркувальних машин, то вони застосовуються при нанесенні поперечної горизонтальної дорожньої розмітки, відповідних розмічальних знаків, символів тощо, а також на тих ділянках міських вулиць та доріг, де практично не можливо здійснити нанесення розмітки самохідними та/або причіпними маркувальними машинами, враховуючи їхні габарити (технічні параметри). У табл. 6 наведено ряд переваг та недоліків маркувальних машин, в залежності від їхнього типу.

Висновки. Аналіз існуючих типів маркувальних машин та способів нанесення горизонтальної дорожньої розмітки свідчить про те, що в Україні найрозповсюдженішим способом нанесення є її нанесення самохідними та причіпними маркувальними машинами фарбами дорожніми, повітряним та безповітряним способом нанесення.

Для того, щоб об'єктивно стверджувати про більш чіткі переваги, особливості та недоліки того чи іншого типу маркувальної машини, способу нанесення розмічального матеріалу, виду самого розмічального матеріалу тощо, потрібно провести відповідні натурні дослідження від процесу нанесення до завершення експлуатації влаштованої горизонтальної дорожньої розмітки, щоб із плином часу оцінити зміну її основних експлуатаційних показників (коефіцієнт яскравості, коефіцієнт яскравості за розсіяного денного та штучного освітлення, коефіцієнт світлоповертання за сухого, зволоженого покриття та під час дощу, коефіцієнт зчеплення колеса автомобіля з поверхнею горизонтальної розмітки), із урахуванням відповідних техніко-економічних показників.

Враховуючи наведене, беручи до уваги результати аналізу, у подальшому є доцільним дослідити питання доцільності нанесення горизонтальної дорожньої розмітки фарбами дорожніми двічі на календарний рік на автомобільних дорогах із різною інтенсивністю руху, у порівнянні із дорожньою розміткою, влаштованою холодними пластиками, які є дорожчими у частині матеріалів та за технологією нанесення, враховуючи відповідні техніко-економічні обґрунтування, що до сьогодні детально не досліджене для наших умов.

Перелік посилань

1. ДСТУ 2587:2021 Безпека дорожнього руху. Розмітка дорожня. Загальні технічні умови. [На заміну ДСТУ 2587:2010; чинний від 2021-02-11] Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 29 с.

2. ДСТУ 8749:2017 Безпека дорожнього руху. Огородження та організація дорожнього руху в місцях проведення дорожніх робіт. [Чинний від 2017-12-20] Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 37 с.

3. СОУ 42.1-37641918-116:2014 Фарба для горизонтальної розмітки автомобільних доріг. Технічні вимоги та методи випробовування. [На заміну ГСТУ 218-03450778-105-2003; нечинний від 2025-09-01] Вид. офіц. Київ: Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України, 2014. 26 с.

4. Мозговий В.В., Онищенко А.М., Гаркуша М.В., Білан О.О. Моніторинг стану дорожнього одягу для планування ремонтних робіт автомобільних доріг, у тому числі для СУСП. Збірник наукових праць «Дороги і мости». Київ, 2011. №13. С. 76-88.

5. ДСТУ 2587-94 Розмітка дорожня Технічні вимоги. Методи контролю. Правила застосування. [На заміну ГОСТ 13508-74; нечинний від 2011-04-01] Вид. офіц. Київ: УДПО МВС України, 1994. 42 с.

6. СОУ 45.2-00018112-018:2007 Безпека дорожнього руху. Матеріали для горизонтальної розмітки із світлоповертальними властивостями. Загальні технічні вимоги. [нечинний від 2015-01-01] Вид. офіц. Київ: Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України, 2007. 38 с.

7. ДСТУ 2587:2010 Безпека дорожнього руху. Розмітка дорожня. Загальні технічні вимоги. Методи контролювання. Правила застосування. [На заміну ДСТУ 2587-94; нечинний від 2021-08-01] Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарту України, 2010. 45 с.

8. СОУ 42.1-37641918-095:2012 Норми витрат матеріалів для виконання робіт по дорожній горизонтальній розмітці автомобільних доріг. [На заміну Н Г.1-218-03449261-139-2004; чинний від 2012-12-14] Вид. офіц. Київ: Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України, 2012. 16 с.

9. Компанія HOFMANN GmbH, веб-сайт. URL: https://www.hofmannmarking.de (рік відвідування 2025).

10. Компанія GRACO Inc., веб-сайт. URL: https://www.graco.com (рік відвідування 2025).

ANALYSIS OF HORIZONTAL ROAD MARKING TECHNOLOGIES

Styozhka Vitaliy V., Ph.D., (Candidate of Technical Science), National Transport University, Kyiv, Ukraine, styozhka@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-5039-9852

Shnaider Mykhailo I., PhD student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, misha.shnayder@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-7788-1158

Summary. In order to understand the structure of types, manufacturers, and methods of applying horizontal road markings in the total number of marking machines in Ukraine, it was decided to analyse open tenders, information about which is publicly available. It should be noted that the largest volumes of horizontal road markings are applied on public roads and in large settlements. When considering public roads, the main volume of horizontal road markings is applied on roads of national importance, since local roads sometimes do not have a solid surface. For this reason, only roads of national importance were taken into account during the analysis.

As a result, 110 public procurements in 20 regions of our country, which took place between 2023 and 2024, were analysed. The study was conducted using the Prozorro electronic public procurement system. The above number of analysed procurements for the operational maintenance of motorways included those procurements that contained information on the provision of services for applying horizontal road markings. During the study, information about the mechanisms (techniques) used for applying road markings and provided in the documents of the tender winners with whom contracts were signed was used.

Keywords: horizontal road markings, paint application method, self-propelled marking machine, trailer-mounted marking machine, manual marking machine, road paint, hot-applied plastic, cold-applied plastic, spray plastic.

References

1. DSTU 2587:2021 Road safety. Road markings. General specifications. [Replaces DSTU 2587:2010; effective from 11 February 2021] Official publication. Kyiv: State Enterprise ‘UkrNDNC’, 2021. 29 p.

2. ДСТУ 8749:2017 Road safety. Guidance for the control and management of traffic at road works. [Effective from 20 December 2017] Official publication. Kyiv: State Enterprise ‘UkrNDNC’, 2017. 37 p.

3. SOU 42.1-37641918-116:2014 Paint for horizontal marking of motorways. Technical requirements and testing methods. [Replaces GOST 218-03450778-105-2003; invalid from 2025-09-01] Official edition. Kyiv: State Agency for Infrastructure Restoration and Development of Ukraine, 2014. 26 p.

4. Mozgovyi V.V., Onishchenko A.M., Garkusha M.V., Bilan O.O. Monitoring the condition of road surfaces for planning motorway repair works, including for the SUSP. Collection of scientific works 'Roads and Bridges'. Kyiv, 2011. No. 13. Pp. 76-88.
5. DSTU 2587-94 Road markings Technical requirements. Control methods. Rules of application. [Replaces GOST 13508-74; invalid since 2011-04-01] Official edition. Kyiv: UDPO MVS Ukraine, 1994. 42 p.
6. SOU 45.2-00018112-018:2007 Road safety. Materials for horizontal markings with light-reflecting properties. General technical requirements. [invalid since 2015-01-01] Official publication. Kyiv: State Agency for the Restoration and Development of Infrastructure of Ukraine, 2007. 38 p.
7. DSTU 2587:2010 Road safety. Road markings. General technical requirements. Control methods. Rules of application. [Replaces DSTU 2587-94; invalid from 2021-08-01] Official edition. Kyiv: State Consumer Standards of Ukraine, 2010. 45 p.
8. SOU 42.1-37641918-095:2012 Standards for material consumption for road horizontal marking works on motorways. [Replaces NG.1-218-03449261-139-2004; effective from 14 December 2012] Official publication. Kyiv: State Agency for the Restoration and Development of Infrastructure of Ukraine, 2012. 16 p.
9. HOFMANN GmbH, website. URL: https://www.hofmannmarking.de (accessed in 2025).
10. GRACO Inc., website. URL: https://www.graco.com (accessed in 2025).

УДК 625.7/.8 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-191-198**
UDC 625.7/.8

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ДРЕНАЖІВ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

METHODS FOR DETERMINING THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SHALLOW DRAINAGE SYSTEMS DURING OPERATION



Тищенко Олег Анатолійович, *аспірант, кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e- mail: tishchenko1986@gmail.com,*

https://orcid.org/0009-0006-0673-2378

Анотація: У статті розглянуто сучасні лабораторні, польові, геофізичні та числові методи визначення пропускної здатності дренажів мілкого закладання. Проведено порівняльний аналіз методів із врахуванням точності, вартості, простоти виконання та діапазону застосування [1,2]. Представлено закордонний досвід використання методів у США, Канаді та Європі [1,2]. Наведено приклади інтегрованого застосування для підвищення точності оцінки пропускної здатності [3,4]. Результати статті можуть бути використані для проектування, моніторингу та оптимізації дренажних систем у будівництві та інженерній практиці [5,10].

У роботі показано, що лабораторні методи забезпечують високу точність вимірювань, проте обмежені розміром зразків та умовами проведення [3–5]. Польові методи дозволяють враховувати природну неоднорідність ґрунту та сезонні коливання вологості [2,9]. Геофізичні методи дають можливість оцінювати великі території та глибокі шари ґрунту без руйнування середовища [2]. Числове моделювання інтегрує дані з різних джерел і дозволяє прогнозувати роботу систем дренажу під різними сценаріями [10]. Розглянуто приклади інтегрованого застосування методів для зменшення витрат на обслуговування та підвищення ефективності водовідведення [1,2]. Стаття підкреслює значення комплексного підходу для забезпечення довготривалої стабільної роботи дренажних систем [1,2,10].

Ключові слова: Пропускна здатність, дренажі мілкого закладання, лабораторні методи, польові методи, геофізичні методи, числове моделювання, FEM, COMSOL Multiphysics, інтегрований підхід.

Вступ. У сучасних умовах розвитку будівництва, гідротехніки та екологічного моніторингу питання дослідження проникності ґрунтів набуває особливої актуальності. Визначення коефіцієнта фільтрації є одним із ключових завдань при оцінюванні інженерно-геологічних умов територій, адже саме від цього показника залежить точність прогнозу фільтраційних процесів, стабільність основ споруд та ефективність дренажних систем [1].

Незважаючи на значну кількість розроблених методик, проблема отримання достовірних результатів щодо фільтраційних властивостей ґрунтів залишається складною. Це пов’язано як із різноманітністю ґрунтових структур, так і з впливом природних чинників, зокрема вологості, ущільнення та неоднорідності порового простору. Тому особливої важливості набувають методи, що дозволяють поєднати точність лабораторних досліджень із наближеними до природних умовами польових випробувань.

Дослідження проникності є не лише завданням інженерної геології, а й має міждисциплінарне значення — від гідрогеології до охорони довкілля. Визначення характеристик фільтрації забезпечує наукове підґрунтя для моделювання міграції забруднювачів, проєктування водозахисних бар'єрів, аналізу стійкості споруд та управління ґрунтовими водами [1,2,3,10].

Постановка проблеми: Для сучасних інженерно-геологічних досліджень надзвичайно важливо забезпечити високу точність визначення коефіцієнта фільтрації, оскільки навіть незначні похибки можуть призвести до спотворення результатів моделювання фільтраційних процесів. Традиційні лабораторні методи, попри точність, не завжди відображають реальні умови залягання ґрунтів, тоді як польові випробування мають ряд практичних обмежень, пов'язаних із складністю виконання, часовими витратами та впливом зовнішніх факторів.

Таким чином, постає потреба у вдосконаленні методичних підходів до оцінювання проникності ґрунтів, які б поєднували переваги лабораторних та польових методів і дозволяли отримувати стабільні результати за різних умов залягання.

Вирішення цієї проблеми можливе завдяки поєднанню експериментальних даних із числовим моделюванням, що відкриває можливості для глибшого аналізу механізмів фільтрації та підвищення достовірності результатів.

Мета роботи: Метою статті є комплексне дослідження сучасних методів визначення пропускної здатності дренажів мілкого закладання, порівняння їх ефективності, точності, вартості та простоти виконання, а також представлення інтегрованого підходу з використанням закордонного досвіду [1,2].

Матеріали та методи. Для дослідження були розглянуті такі категорії методів:

1. Лабораторні методи: постійний та змінний рівень води, подвійне кільце.
2. Польові методи: шнекове буріння, Guelph Permeameter.
3. Геофізичні методи: електричний опір, сейсмічне зондування.
4. Числове моделювання: FEM, COMSOL Multiphysics.

Для кожного методу були розглянуті принцип роботи, точність, простота виконання, діапазон застосування та закордонний досвід використання. Включено приклади вартості проведення випробувань та інтеграції з іншими методами [1–10].

Результати та пояснення

1. Лабораторні методи

1.1. Постійний рівень води (Constant Head Test)

Метод полягає у вимірюванні швидкості протікання води через ґрунтовий зразок при підтриманні постійного рівня води у колонці. Він підходить для високопроникних ґрунтів, таких як піски і гравії. Основна перевага методу – висока точність і відтворюваність результатів у стандартизованих лабораторних умовах [3].

Лабораторні випробування дозволяють контролювати температуру, ступінь насиченості та інші параметри, що впливають на пропускну здатність ґрунту. Одним із обмежень є те, що метод не враховує природну неоднорідність ґрунту на великій площі. Іншою важливою особливістю є вплив гідравлічного гістерезису, який може змінювати результати при повторних циклах зволоження та висихання [7]. Tan (1989) показав, що точність вимірювання може досягати 95% при коректній підготовці зразка [3].

Метод дозволяє оцінити коефіцієнт фільтрації для розрахунку пропускної здатності дренажів мілкого закладання. Він ефективний при проектуванні дренажних систем для споруд із обмеженою глибиною залягання. Водночас застосування постійного рівня води не дозволяє враховувати капілярні ефекти, характерні для глинуватих ґрунтів [7].

Метод потребує точного контролю герметичності системи та рівня води. У сучасних лабораторіях використовують автоматизовані системи для підтримки постійного рівня води та фіксації швидкості потоку [3,6]. Постійний рівень води особливо корисний для первинної оцінки властивостей пісків та супісків перед застосуванням польових методів.

1.2. Змінний рівень води (Falling Head Test)

Метод полягає у вимірюванні часу, за який вода в колонці знижується від початкового до кінцевого рівня. Найбільш ефективний для низькопроникних ґрунтів, таких як супіски і глини [5].
Falling Head Test дозволяє враховувати вплив дрібнопористої структури ґрунту на пропускну здатність. Однією з переваг є можливість автоматизації процесу вимірювань, що зменшує похибки через людський фактор. Lee (2024) застосував метод у США для точного визначення гідравлічної провідності глин, досягнувши точності до 5% [5].
Метод враховує різницю у швидкості потоку через неоднорідні шари ґрунту, що важливо для прогнозування роботи дренажів. Недоліком є потреба у герметичності системи та стабільному контролі температури. Falling Head Test ефективний для визначення коефіцієнта фільтрації на різних глибинах та для прогнозування водопроникності ґрунтів під час сезонних змін вологості [5].
Метод широко використовується у європейських лабораторіях для підготовки даних до числового моделювання. Він дозволяє враховувати капілярні ефекти і ступінь насиченості, що важливо для мілкого закладання дренажів [2]. Застосування цього методу у комплексі з польовими випробуваннями забезпечує більш точну оцінку пропускної здатності.

1.3. Метод подвійного кільця (Double-Ring Infiltrometer)

Метод дозволяє вимірювати вертикальну швидкість інфільтрації води через ґрунт із мінімізацією впливу бічного потоку. Використовується переважно для верхніх шарів ґрунту, де відбувається основний обмін води з поверхнею [4]. Verbist (2010) показав, що подвійне кільце дає більш відтворювані результати для неоднорідного ґрунту, ніж одинарне кільце [4].
Метод дозволяє оцінювати швидкість інфільтрації при різних початкових умовах вологості. Перевагою є простота проведення та можливість швидкого збору даних у польових умовах. Недоліком є те, що глибокі шари не враховуються, тому метод найкраще комбінувати з числовим моделюванням.

Метод ефективний для пісків, супісків та слабких глинуватих ґрунтів. Він дозволяє визначати коефіцієнт фільтрації для верхнього горизонту, що важливо для мілкого закладання дренажів. Метод використовується в лабораторних та польових дослідженнях у Бельгії, Нідерландах та Канаді. Результати добре інтегруються у числові моделі для прогнозування пропускної здатності [2,4].

2. Польові методи

2.1. Шнекове буріння

Метод шнекового буріння дозволяє відбирати зразки ґрунту для визначення водопроникності у природних умовах. Основна перевага полягає у простоті та відносній дешевизні, що робить метод популярним для оперативного польового моніторингу. Вартість проведення одного тесту складає приблизно 200–400 USD [2].
Метод ефективний для верхніх шарів ґрунту і дозволяє оцінювати просторову неоднорідність ґрунтового масиву. Основним обмеженням є вплив погодних умов та сезонних коливань рівня ґрунтових вод, що може викликати різницю у результатах при повторних вимірюваннях у різні періоди року.
Метод активно застосовується у Канаді та США для проектування систем мілкого дренажу, а також у сільському господарстві для оптимізації поливу та контролю за водоутримуючими властивостями ґрунтів [2].

2.2. Guelph Permeameter

Guelph Permeameter дозволяє вимірювати коефіцієнт фільтрації ґрунту безпосередньо у полі. Метод використовується для верхніх шарів ґрунту та дає повторювані результати [9]. Вартість одного тесту – 200–400 USD.

Перевагами методу є швидке проведення, можливість контролю рівня води, точне вимірювання швидкості інфільтрації та адаптація до різних типів ґрунту. Недоліками є чутливість до органічних залишків у ґрунті, що може спотворювати результати, та необхідність ретельної підготовки ділянки.

Метод активно використовується у США та Канаді для швидкої оцінки пропускної здатності ґрунтів. Дані, отримані за допомогою Guelph Permeameter, часто використовуються для калібрування числових моделей та порівняння з лабораторними результатами [9].

3. Геофізичні методи

3.1. Електричний опір

Метод електричного опору дозволяє оцінити вологоємність ґрунту та його водопроникність на великих ділянках без руйнування ґрунту [2]. Вартість польового виїзду коливається від 1500 до 5000 USD.

Переваги методу включають швидкість проведення та можливість охоплення великих територій без необхідності відбору фізичних зразків ґрунту. Обмеженням є чутливість до солоності ґрунту, мінерального складу та температури, що може впливати на точність результатів.

Метод застосовується для картографування зон із підвищеною вологоємністю, оцінки неоднорідності ґрунту та планування дренажних систем у складних ґрунтових умовах. В Нідерландах електричний опір широко використовується для масштабного зондування територій із високим рівнем ґрунтових вод [2].

3.2. Сейсмічне зондування

Сейсмічне зондування дозволяє визначити глибину та структуру водопроникних шарів ґрунту [2]. Вартість проведення одного польового виїзду становить 1500–5000 USD.

Переваги методу включають можливість дослідження глибоких шарів ґрунту та масштабність досліджень, що дозволяє оцінювати великі території. Основними обмеженнями є потреба у висококваліфікованому персоналі та спеціалізованому обладнанні.

Метод застосовується у США та Європі для оцінки складних ґрунтових умов, де традиційні лабораторні та польові методи недостатньо ефективні. Сейсмічне зондування часто комбінують з числовим моделюванням для побудови тривимірних моделей дренажних систем [2].

4. Числове моделювання

4.1. FEM та COMSOL Multiphysics

Числове моделювання дозволяє інтегрувати дані з лабораторних, польових та геофізичних методів для комплексного прогнозування пропускної здатності дренажів мілкого закладання [10]. Метод базується на розв'язанні диференціальних рівнянь руху води у пористому середовищі з урахуванням фізико-механічних властивостей ґрунту та сезонних коливань рівня ґрунтових вод.

Переваги числового моделювання включають прогнозування роботи дренажних систем під різними сценаріями, оптимізацію конструкцій, оцінку впливу змін клімату та гідрологічних умов. Вартість проекту становить 1000–3000 USD. Основними обмеженнями є висока складність, потреба у ліцензійному ПЗ та потужних обчислювальних ресурсах [10].

Метод дозволяє моделювати роботу дренажних систем із урахуванням неоднорідності ґрунтів, багатошарових структур, впливу поверхневого стоку та гідравлічного гістерезису. FEM та COMSOL Multiphysics інтегрують дані лабораторних та польових вимірювань, геофізичних тестів, що дозволяє створювати масштабні моделі територій і прогнозувати довгострокову ефективність дренажів [10].

Числове моделювання також дозволяє оцінити вплив різних параметрів конструкції дренажів, таких як діаметр труб, відстань між дренажними лотками та глибина закладання, на пропускну здатність і стійкість системи [10].

Порівняння методів

Лабораторні методи забезпечують високу точність і контрольовані умови вимірювань, проте мають обмежений діапазон застосування та високу вартість (500–800 USD за серію зразків) [3–5]. Польові методи дешевші (200–400 USD) і дозволяють оцінювати властивості ґрунту в природних умовах, враховуючи сезонні коливання рівня ґрунтових вод [2,9]. Геофізичні методи (1500–5000 USD) дають змогу охоплювати великі території і досліджувати глибокі шари ґрунту без руйнування середовища [2]. Числове моделювання (1000–3000 USD) забезпечує інтеграцію даних з лабораторних, польових та геофізичних методів для прогнозу роботи дренажів [10].

Лабораторні методи, такі як постійний та змінний рівень води, дозволяють точно визначити коефіцієнт фільтрації високопроникних і низькопроникних ґрунтів відповідно [3–

5]. Метод подвійного кільця ефективний для оцінки інфільтрації у верхніх шарах ґрунту та швидкого збору даних у польових умовах [4]. Польові методи забезпечують оперативність вимірювань і враховують природну неоднорідність ґрунту, але їх точність може знижуватися під впливом погодних умов або органічних залишків [2,9].

Геофізичні методи є ефективними для картографування великих ділянок та виявлення зон підвищеної вологості, однак чутливі до солоності ґрунту та мінерального складу [2]. Сейсмічне зондування дозволяє визначити глибину та структуру водопроникних шарів, що важливо для прогнозу ефективності глибоких дренажів [2]. Числове моделювання FEM/COMSOL дозволяє проводити сценарне моделювання, враховувати сезонні коливання рівня води та оптимізувати конструкції дренажних систем [10].

Інтеграція методів дозволяє компенсувати обмеження кожного з них: лабораторні дані калібрують числові моделі, польові вимірювання уточнюють неоднорідність ґрунту, а геофізичні методи забезпечують масштабне картографування [1,2]. Закордонний досвід показує, що поєднання цих методів підвищує точність визначення пропускної здатності до 95% і зменшує витрати на обслуговування дренажів на 20–30% [1,2]. Використання комплексного підходу дозволяє планувати профілактичне обслуговування та виявляти проблемні ділянки на ранніх етапах [1,2].

***Таблиця* 1** – Порівняння методів та вартості
Table 1 – Comparison of methods and cost

Метод	**Точність**	**Простота**	**Діапазон**	**Вартість (USD)**	**Переваги**	**Обмеження**	**Джерела**
Лабораторний постійний рівень води	Висока	Середня	Високопроникні ґрунти	500–800	Контрольовані умови	Не враховує неоднорідність	[3,6,7]
Лабораторний змінний рівень води	Висока	Середня	Низькопроникні ґрунти	500–800	Враховує дрібнопористу структуру	Потребує герметичності	[5,7]
Подвійне кільце	Середня	Висока	Верхні шари	200–400	Простота, польові умови	Не враховує глибокі шари	[4]
Шнекове буріння	Середня	Висока	Верхні шари	200–400	Оперативність	Вплив погодних умов	[2]
Guelph Permeameter	Висока	Середня	Верхні шари	200–400	Повторюваність	Чутливий до органіки	[9]
Електричний опір	Середня	Складна	Великі ділянки	1500–5000	Без руйнування ґрунту	Чутливий до солоності	[2]
Сейсмічне зондування	Середня	Складна	Глибокі шари	1500–5000	Великі площі	Потрібна кваліфікація	[2]
FEM/COMSOL	Висока	Складна	Всі типи ґрунтів	1000–3000	Прогноз, інтеграція	Висока складність	[10]

Перевагою порівняння методів є можливість адаптації до різних типів ґрунтів та умов експлуатації, а також швидка оцінка економічної ефективності [2,9]. Результати порівняння дозволяють інженерам приймати оптимальні рішення щодо вибору методів для конкретного проекту, зменшуючи ризик помилок і підвищуючи надійність дренажних систем [1,2].

Висновки. Пропускна здатність дренажів мілкого закладання значною мірою залежить від типу ґрунту, його структури та ступеня насиченості. В умовах експлуатації сезонні коливання рівня ґрунтових вод можуть впливати на ефективність системи, тому важливо враховувати природну неоднорідність ґрунту [1,2].

Лабораторні методи, такі як постійний та змінний рівень води, забезпечують високу точність вимірювань та контрольовані умови. Проте вони обмежені розміром зразків і не відображають повністю природну неоднорідність ґрунту, тому потребують додаткових польових перевірок [3–5].

Польові методи, включаючи шнекове буріння та Guelph Permeameter, дозволяють швидко та економічно оцінювати властивості ґрунту на місцевості. Вони враховують природні умови та сезонні коливання вологості, що робить їх важливими для оперативного контролю стану дренажів [2,9].

Геофізичні методи, такі як електричний опір та сейсмічне зондування, ефективні для картографування великих територій та оцінки глибоких шарів ґрунту. Вони дозволяють без руйнування досліджувати неоднорідність ґрунту та виявляти проблемні ділянки для оптимізації дренажних систем [2].

Числове моделювання FEM і COMSOL Multiphysics інтегрує дані лабораторних, польових та геофізичних методів. Це дозволяє прогнозувати роботу дренажів у різних умовах, оптимізувати конструкцію системи та планувати технічне обслуговування [10].

Лабораторні та польові методи використовуються для первинної оцінки властивостей ґрунту та визначення коефіцієнта фільтрації. Дані з цих методів потім застосовуються для калібрування геофізичних і числових моделей, що підвищує точність прогнозів [1,2].

Закордонний досвід показує ефективність комплексного підходу: лабораторні та польові випробування поєднують із геофізичними методами та числовим моделюванням. Така інтеграція дозволяє підвищити точність оцінки пропускної здатності дренажів до 95% і зменшити ризик непередбачуваних проблем [1,2].

Метод постійного рівня води забезпечує точну оцінку коефіцієнта фільтрації високопроникних ґрунтів. Він особливо корисний при первинному проектуванні дренажних систем для пісків і гравіїв, де важлива швидкість водопроникності [3,7].

Метод змінного рівня води ефективний для низькопроникних ґрунтів, таких як суміски та глини. Він дозволяє враховувати вплив дрібнопористої структури ґрунту на пропускну здатність та зменшує похибки вимірювань [5].

Метод подвійного кільця дозволяє оцінювати швидкість інфільтрації у верхніх шарах ґрунту. Його результати добре інтегруються у числові моделі для прогнозування ефективності мілкого дренажу та планування технічного обслуговування [4].

Шнекове буріння та Guelph Permeameter зручні для оперативного польового моніторингу та контролю стану дренажів. Вони економічні, дозволяють враховувати природні умови та забезпечують повторюваність результатів у польових випробуваннях [2,9].

Електричний опір та сейсмічне зондування дозволяють оцінювати великі ділянки та глибокі шари ґрунту. Вони ефективні для картографування зон підвищеної вологості та виявлення проблемних ділянок без руйнування ґрунту [2].

Числове моделювання FEM/COMSOL дозволяє врахувати сезонні коливання рівня ґрунтових вод та фізико-механічні властивості ґрунту. Воно дозволяє прогнозувати роботу дренажів у різних умовах та оптимізувати конструкцію системи для забезпечення довготривалої ефективності [10].

Інтегрований підхід, який поєднує лабораторні, польові, геофізичні та числові методи, підвищує точність прогнозів і надійність дренажів. Він зменшує ризики непередбачуваних проблем та дозволяє ефективно планувати технічне обслуговування [1,2,10].

Комплексне застосування методів дозволяє оптимізувати конструкцію дренажів, включаючи діаметр труб, глибину закладання та відстань між лотками. Це забезпечує рівномірне водовідведення та мінімізує зону застою води у ґрунті [1,2].

Вартість інтегрованого підходу окупається завдяки зменшенню витрат на ремонт, обслуговування та непередбачувані збої. Застосування комплексних методів дозволяє підвищити економічну ефективність експлуатації дренажних систем [1,2].

Закордонний досвід підтверджує, що комбіноване застосування лабораторних, польових, геофізичних та числових методів є найефективнішим для оцінки пропускної здатності дренажів. Це забезпечує точніші дані для інженерного проектування та експлуатації систем [1,2].

Більшість сезонних змін вологості відбувається у верхніх шарах ґрунту, що важливо враховувати при проектуванні мілкого дренажу. Це підтверджує необхідність поєднання польових методів із числовим моделюванням для точного прогнозування [1,2].

Довготривале осідання та зміни пропускної здатності ґрунту у процесі експлуатації, як правило, є незначними. Проте їх слід враховувати при довгостроковому плануванні технічного обслуговування та реконструкції дренажів [1,2].

Комплексне використання методів забезпечує стабільну роботу дренажів мілкого закладання. Це дозволяє підвищити ефективність водовідведення, продовжити строк служби системи та зменшити ризики пошкодження інженерних споруд [1,2,10].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Bouwer, H. Field methods for determining hydraulic conductivity of soils // *Journal of the Irrigation and Drainage Division. American Society of Civil Engineers (ASCE)*. – 1964. – Vol. 90, No. 3. – P. 1–19.
2. Noshadi, I**.**, *et al.* Comparison of field and laboratory methods for soil permeability measurement // *Geotechnical Testing Journal*. – West Conshohocken : ASTM International, 2012. – Vol. 35, No. 3. – P. 1–12.
3. Tan, B**.,** *et al.* Laboratory determination of hydraulic conductivity of sands // *Soil Science Society of America Journal*. – 1989. – Vol. 53, No. 5. – P. 1383–1390.
4. Verbist, K**.,** *et al.* Double-ring infiltrometer tests in heterogeneous soils // *Journal of Hydrology*. – 2010. – Vol. 381, No. 1–2. – P. 39–49.
5. Lee, S**.**, *et al.* Falling head tests in low-permeability soils // *Water Resources Research*. – 2024. – Vol. 60, No. 4. – P. 1–15.
6. Bouwer, H. Intensive soil permeability testing methods // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1978. – Vol. 104, No. 12. – P. 1527–1536.
7. Raats, P.A.C. Capillarity and hysteresis in soil–water systems // *Soil Science Society of America Journal*. – 2000. – Vol. 64, No. 1. – P. 23–29.
8. McCuen, R. *Hydrology: Principles, Analysis, and Design*. – 3rd ed. – Upper Saddle River, NJ : Pearson Education, 2013. – 888 p.
9. University of Guelph. *Guelph Permeameter Manual*. – Guelph : University of Guelph, 2015. – 45 p.
10. COMSOL, Inc. *COMSOL Multiphysics User Guide*. – Stockholm : COMSOL AB, 2022. – 950 p.

METHODS FOR DETERMINING THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SHALLOW DRAINAGE SYSTEMS DURING OPERATION

Tyshchenko Oleg A., PhD student at the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: tishchenko1986@gmail.com, tel.+380442803942, https://orcid.org/0009-0006-0673-2378

Summary. The article examines modern laboratory, field, geophysical, and numerical methods for determining the hydraulic conductivity of shallow drainage systems. A comparative analysis of the methods is conducted, taking into account accuracy, cost, ease of implementation, and application range [1,2]. Foreign experience in the use of these methods in the USA, Canada, and Europe is presented [1,2]. Examples of integrated applications to improve the accuracy of hydraulic conductivity assessment are provided [3,4]. The results of the study can be used for the design, monitoring, and optimization of drainage systems in construction and engineering practice [5,10].

The study shows that laboratory methods provide high measurement accuracy but are limited by sample size and testing conditions [3–5]. Field methods allow consideration of natural soil heterogeneity and seasonal fluctuations in groundwater levels [2,9]. Geophysical methods make it possible to assess large areas and deep soil layers without disturbing the environment [2]. Numerical modeling integrates data from various sources and allows prediction of drainage system performance under different scenarios [10]. Examples of integrated method application are provided to reduce maintenance costs and improve water drainage efficiency [1,2]. The article emphasizes the importance of a comprehensive approach to ensure long-term stable operation of drainage systems [1,2,10].

Additionally, the cost and efficiency of each method are evaluated, enabling engineers to make economically sound decisions [2,9]. Examples of method application in different soil types and climatic conditions are presented [1,3,5]. The combination of laboratory, field, and numerical methods is discussed to enhance prediction accuracy [4,10]. The article also considers the prospects for implementing modern technologies and automation in measurements to optimize the process of determining hydraulic conductivity in shallow drainage systems [10].

Keywords: Hydraulic conductivity, shallow drainage systems, laboratory methods, field methods, geophysical methods, numerical modeling, FEM, COMSOL Multiphysics, integrated approach.

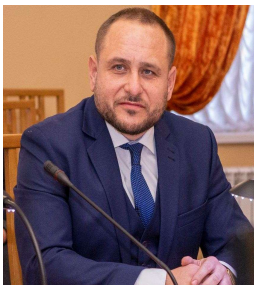
REFERENCES

1. Bouwer, H. Field methods for determining hydraulic conductivity of soils // *Journal of the Irrigation and Drainage Division. American Society of Civil Engineers (ASCE)*. – 1964. – Vol. 90, No. 3. – P. 1–19.
2. Noshadi, I**.**, *et al.* Comparison of field and laboratory methods for soil permeability measurement // *Geotechnical Testing Journal*. – West Conshohocken : ASTM International, 2012. – Vol. 35, No. 3. – P. 1–12.
3. Tan, B.**,** *et al.* Laboratory determination of hydraulic conductivity of sands // *Soil Science Society of America Journal*. – 1989. – Vol. 53, No. 5. – P. 1383–1390.
4. Verbist, K.**,** *et al.* Double-ring infiltrometer tests in heterogeneous soils // *Journal of Hydrology*. – 2010. – Vol. 381, No. 1–2. – P. 39–49.
5. Lee, S**.**, *et al.* Falling head tests in low-permeability soils // *Water Resources Research*. – 2024. – Vol. 60, No. 4. – P. 1–15.
6. Bouwer, H. Intensive soil permeability testing methods // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1978. – Vol. 104, No. 12. – P. 1527–1536.
7. Raats, P.A.C. Capillarity and hysteresis in soil–water systems // *Soil Science Society of America Journal*. – 2000. – Vol. 64, No. 1. – P. 23–29.
8. McCuen, R. *Hydrology: Principles, Analysis, and Design*. – 3rd ed. – Upper Saddle River, NJ : Pearson Education, 2013. – 888 p.
9. University of Guelph. *Guelph Permeameter Manual*. – Guelph : University of Guelph, 2015. – 45 p.
10. COMSOL, Inc. *COMSOL Multiphysics User Guide*. – Stockholm : COMSOL AB, 2022. – 950 p.

УДК 528:332.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-199-205**
UDC 528:332.3

ФОРМУВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

FORMATION OF METROLOGICAL SUPPORT OF GEODESICAL ACTIVITIES



Мамонов Костянтин Анатолійович, *доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0002-0797-2609



Афанасьєв Олександр Валерійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: AfanasyevAV@kname.edu.ua*

https://orcid.org/0000-0001-7649-7576



Вяткін Роман Сергійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: viatkinr@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-8807-9988



Фролов Вячеслав Олександрович, *кандидат технічних наук, асистент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: frolgis@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-8045-3963

Анотація. Визначено, що формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності є важливим компонентом, що впливає на якість та повноту просторового забезпечення територіального розвитку використання земель. Створення метрологічного забезпечення у сфері геодезичної діяльності є складним багатоаспектним процесом, що включає інструментальні, технологічні, технічні компоненти.

У результаті дослідження досягнута мета щодо визначення напрямів та особливостей формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності. Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання: характеристика напрямів формування метрологічного забезпечення

геодезичної діяльності; виокремлення чинників, що впливають на формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності.

Метрологічне забезпечення геодезичної діяльності визначається як система здійснення вимірювань із застосування технологічних, технічних, організаційних, інформаційних, метрологічних норм і правил, спрямованих на досягнення повноти, якості вимірювань геодезичним інструментарієм для формування просторового забезпечення територіального розвитку використання земель.

Запропоновано визначення метрологічного забезпечення геодезичної діяльності, яке базується на його системних параметрах, особливостях його формування й застосування. Виокремлені особливості формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності, які визначаються впливом функціональних, організаційних, стейкхолдерних, технічних, технологічних чинників. Метрологічне забезпечення впливає на якість виконання геодезичних робіт, які спрямовані на зростання повноти просторового забезпечення у системі територіального розвитку використання земель.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, геодезична діяльність, чинники формування метрологічного забезпечення, просторове забезпечення, територіальний розвиток використання земель.

Вступ. Формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності є важливим компонентом, що впливає на якість та повноту просторового забезпечення територіального розвитку використання земель. Створення метрологічного забезпечення у сфері геодезичної діяльності є складним багатоаспектним процесом, що включає інструментальні, технологічні, технічні компоненти.

Розробка сучасної системи метрологічного забезпечення потребує застосування відповідної організаційної структури й нормативно-правового забезпечення. Зокрема, для забезпечення метрологічної діяльності розроблено на використовуються законодавчі документи: Закони України «Про приєднання України до Конвенції про заснування Міжнародної організації законодавчої метрології», «Про приєднання України до Метричної конвенції», «Про метрологію та метрологічну діяльність»; Постанови Кабінету міністрів України «Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження уповноваженими науковими метрологічними центрами, державними підприємствами, які належать до сфери управління центрального органу виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності, та провадять метрологічну діяльність, повірочними лабораторіями господарської діяльності з проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) Міністерством розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства», «Про затвердження Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки», Про затвердження Порядку видачі або відмови у видачі свідоцтва про уповноваження на проведення повірки засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології, його анулювання», «Про затвердження Положення про Службу стандартних довідкових даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів», «Про затвердження Порядку здійснення контролю за додержанням правил і умов зберігання та застосування національних еталонів», «Про затвердження Технічного регламенту щодо неавтоматичних зважувальних приладів», «Про визначення наукових метрологічних центрів»; Накази Міністерств економіки та економічного розвитку і торгівлі: «Про затвердження уніфікованої форми акта, складеного за результатами проведення планової (позапланової) перевірки наукового метрологічного центру, державного підприємства, яке належить до сфери управління Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України та провадить метрологічну діяльність, та повірочної лабораторії, які уповноважені на проведення повірки засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології щодо відповідності вимогам Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та встановленим критеріям», «Про затвердження примірних (зразкових) форм деяких документів, що додаються до заяви про уповноваження на проведення повірки засобів вимірювальної техніки, що перебувають в

експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології», «Про затвердження Порядку калібрування вторинних та робочих еталонів», «Деякі питання щодо видачі свідоцтва про уповноваження на проведення повірки засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології», «Про затвердження Методики повірки лічильників води з механічним відліковим пристроєм номінальних діаметрів DN10, DN15, DN20 на місці експлуатації та внесення зміни до Порядку проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів».

На формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності впливають процеси створення та використання людського капіталу, підготовка якого є актуальним питанням.

Таким чином, тема роботи є важливою для формування й повноти просторового забезпечення територіального розвитку використання земель.

Огляд існуючих теоретичних розробок. В існуючих наукових розробках визначені проблемні питання щодо формування метрологічного забезпечення, а саме:

– відсутність системного підходу при організації метрологічного забезпечення якості продукції на етапі виготовлення;

– існуючі процедури метрологічного контролю (метрологічна перевірка згідно ДСТУ 2708, калібрування – ДСТУ 3989) засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), як правило потребують його демонтажу та проводяться в умовах, відмінних від умов експлуатації, що збільшує непевність результатів вимірювань;

– не враховується специфіка промислових ЗВТ, яка полягає у вимірюванні в обмеженій частині його діапазону вимірювання (допустима область зміни технологічного параметру);

– не враховується метрологічна автономність локальної сукупності ЗВТ, які використовуються в конкретному виробництві;

– значні, часто невиправдані, витрати на процедури підтвердження метрологічної відповідності ЗВТ та методик виконання вимірювань [2–7].

Метрологічне забезпечення визначається як встановлення та застосування метрологічних норм і правил, а також розроблення, виготовлення та застосування технічних засобів, необхідних для досягнення єдності і необхідної точності вимірювань [8]. Крім того, визначені організаційні, технічні, технологічні, інформаційні аспекти формування метрологічного забезпечення. На методах і моделях формування метрологічного забезпечення фокусується увага у [9–14].

Таким чином, метрологічне забезпечення геодезичної діяльності визначається як система здійснення вимірювань із застосування технологічних, технічних, організаційних, інформаційних, метрологічних норм і правил, спрямованих на досягнення повноти, якості вимірювань геодезичним інструментарієм для формування просторового забезпечення територіального розвитку використання земель.

Метою дослідження є визначення напрямів та особливостей формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання:

– характеристика напрямів формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності;

– виокремлення чинників, що впливають на формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності.

Виклад основного матеріалу. На формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності впливають чинники. У цьому контексті слід відзначити стейкхолдерні фактори, які характеризуються рівнем взаємодії із зацікавленими особами:

– національною метрологічною службою;

– організаціями, що створюють нормативно-правову базу, у тому числі законодавчі акти, технічні регламенти та інші нормативно-правові акти, що регулюють відносини у сфері метрології та метрологічної діяльності;

– організаціями, що формують національну еталонну базу та систему передачі розмірів одиниць вимірювання;
– стейкхолдери, що функціонують у системі добровільної акредитації калібрувальних лабораторій, а також систему акредитації випробувальних лабораторій, органів з оцінки відповідності у випадках, визначених цим та іншими законами України;
– навчальними закладами, науково-дослідними установами, організаціями, що поширюють знання та досвід у сфері метрології та метрологічної діяльності [15];
– геодезичні організації та підприємства, що здійснюють діяльність у сфері використання земель;
– центральні органи державної влади;
– місцеві органи державної влади;
– органи місцевого самоврядування;
– територіальні громади;
– проектні організації та підприємства, що здійснюють свою діяльність у сфері використання земель;
– будівельні підприємства;
– фінансові й банківські організації;
– страхові організації;
– соціальні організації;
– організації, що забезпечують інформаційну підтримку;
– безпекові організації;
– інші стейкхолдери.

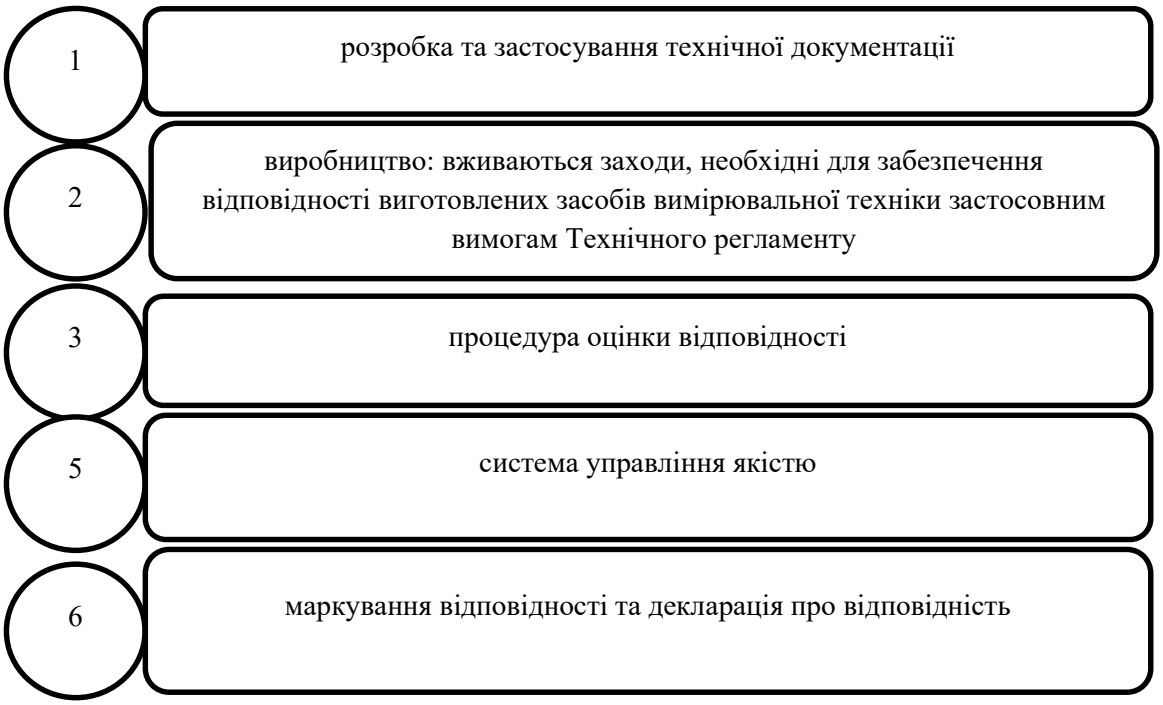


Рисунок 1 *–* *Т*ехнологічні чинники формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності за [16]

Figure 1 *–* Technological factors of formation of metrological support of geodetic activities according to [16]

Виокремлені напрями формування метрологічного забезпечення; здійснення вимірювальних процедур; оцінка відповідності та повірка засобів вимірювальної техніки; забезпечення метрологічного нагляду; калібрування засобів вимірювальної техніки; визнання результатів метрологічних робіт.

Визначені та охарактеризовані технологічні чинники формування метрологічного забезпечення (рис. 1).

Висновки. Таким чином, запропоновано визначення метрологічного забезпечення геодезичної діяльності, яке базується на його системних параметрах, особливостях його формування й застосування.

Виокремлені особливості формування метрологічного забезпечення геодезичної діяльності, які визначаються впливом функціональних, організаційних, стейкхолдерних, технічних, технологічних чинників. Метрологічне забезпечення впливає на якість виконання геодезичних робіт, які спрямовані на зростання повноти просторового забезпечення у системі територіального розвитку використання земель.

Перелік посилань

1. Камінський В. Ю., Мамовик К. М. Методологія синтезу автономної системи метрологічного забезпечення атомних електростанцій. Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. 2010. С. 161–168.
2. Микийчук М. М., Столярчук П. Г. Узагальнена математична модель ефективності системи метрологічного забезпечення виробництва. Український метрологічний журнал. 2011. №4. С. 3–7.
3. Микийчук М. М., Огірко Р. М., Бойко Т. Г. Прогнозування похибок промислових засобів вимірювання температури. Автоматика, вимірювання та керування. Вісник НУ «Львівська політехніка». 2004. № 500. с. 36–40.
4. Огірко Р. М., Микийчук М. М. Принципи побудови універсальних вимірювальних засобів автоматизації технологічних процесів. Вимірювальна техніка і метрологія. 2002. № 59. С. 145–156.
5. Микийчук М. М., Столярчук П. Г. Підвищення метрологічної автономності промислових вимірювань. Метрологія та прилади. 2011. №3. С. 43–47.
6. Микийчук М. М., Столярчук П. Г. Підвищення метрологічної автономності локальних систем вимірювань. Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. 2011. Випуск 1 (27). С. 222–225.
7. Микийчук М., Столярчук П., Бубела Т. Основні завдання та ознаки метрологічного забезпечення якості продукції. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/3848/vtm74st20.pdf
8. Володарський Є. Т., Кухарчук В. В., Поджаренко В. О., Сердюк Г. Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. посібник. Вінниця: ВДТУ, 2001. 2019 с. URL: https://iq.vntu.edu.ua/repository/getfile.php/131.pdf
9. Кононов В. Б., Бурцева В. В. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості. Системи обробки інформації. 2017. Вип. 1 (147). С. 88–92.
10. Кононов В. Б., Науменко А. М., Водолажко О. В., Коваль О. В., Кондрашова І. І. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. Харків: ХНУПС, 2017. С. 288.
11. Кучук Г. А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі. Системи управління, навігації та зв'язку. К.: ЦНДІ НіУ, 2007. Вип. 2. С. 18–27.
12. Кононов В. Б., Науменко А. М., Коваль О. В. Застосування електричних вимірювань засобами вимірювальної техніки в умовах проведення АТО: навч. Посібник. Харків: ХНУПС, 2018. 392 с.

13. Кучук Г. А., Коваленко А. А., Лукова-Чуйко Н. В. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу. Системи управління, навігації та зв'язку. 2017. Вип. 2(42). С. 117–120.

14. Кузнецов І. Б., Марценківський В. Т., Ярошенко О. В., Буяло О. В., Проценко В. О. Удосконалення парку пересувних лабораторій вимірювальної техніки як фактор підвищення оперативності та ефективності метрологічного обслугову-вання складних систем. Збірник наукових праць КНУ. 2011. Вип. 32. С. 33–46.

15. Про метрологію та метрологічну діяльність. Документ 1314-VII. Редакція від 15.11.2024. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text

16. Про затвердження Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки. Постанова Кабінету міністрів України від 24 лютого 2016 р. № 163. Документ 163-2016-п. Редакція від 27.09.2024. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/163-2016-п#Text

FORMATION OF METROLOGICAL SUPPORT OF GEODESICAL ACTIVITIES

Mamonov Kostiantyn A., Doctor of Economic Sciences, Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com, tel. +380992917354, http://orcid.org/0000-0002-0797-2609

Afanasiev Oleksandr V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov, Kharkiv, Ukraine, e-mail: AfanasyevAV@kname.edu.ua, tel.+380662278395, https://orcid.org/0000-0001-7649-7576

Vyatkin Roman S., Candidate of technical sciences, docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: viatkinr@gmail.com, tel. +380950034439, https://orcid.org/0000-0001-8807-9988

Frolov Viacheslav O., Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: frolgis@gmail.com, тел. +380509816112, https://orcid.org/0000-0001-8045-3963

Summary. It was determined that the formation of metrological support for geodetic activities is an important component that affects the quality and completeness of spatial support for territorial development of land use. The creation of metrological support in the field of geodetic activities is a complex multifaceted process that includes instrumental, technological, technical components.

As a result of the study, the goal of determining the directions and features of the formation of metrological support for geodetic activities was achieved. To achieve the set goal, the following tasks were solved: characterization of the directions of formation of metrological support for geodetic activities; identification of factors that influence the formation of metrological support for geodetic activities.

Metrological support for geodetic activities is defined as a system of measurements using technological, technical, organizational, informational, metrological norms and rules aimed at achieving completeness and quality of measurements with geodetic tools for the formation of spatial support for territorial development of land use.

The definition of metrological support of geodetic activity is proposed, which is based on its system parameters, features of its formation and application. The features of the formation of metrological support of geodetic activity are identified, which are determined by the influence of functional, organizational, stakeholder, technical, technological factors. Metrological support affects the quality of geodetic work, which is aimed at increasing the completeness of spatial support in the system of territorial development of land use.

Keywords: metrological support, geodetic activities, factors of formation of metrological support, spatial support, territorial development of land use.

References

1. Kaminsky, V. Yu., Mamovyk, K. M. (2010) Methodology of synthesis of autonomous system of metrological support of nuclear power plants. Collection of scientific works of SNUYAEtaP. P. 161–168.

2. Mykiychuk, M. M., Stolyarchuk, P. G. (2011) Generalized mathematical model of efficiency of system of metrological support of production. Ukrainian Metrological Journal. № 4. P. 3–7.

3. Mykiychuk, M. M., Ogirko, R. M., Boyko, T. G. (2004) Forecasting errors of industrial means of measuring temperature. Automation, measurement and control. Bulletin of NU «Lviv Polytechnic». № 500. p. 36–40.

4. Ogirko, R. M., Mykiychuk, M. M. (2002) Principles of construction of universal measuring means of automation of technological processes. Measuring technique and metrology. № 59. P. 145–156.

5. Mykiychuk, M. M., Stolyarchuk, P. G. (2011) Increasing the metrological autonomy of industrial measurements. Metrology and Instruments. № 3. P. 43–47.

6. Mykiychuk, M. M., Stolyarchuk, P. G. (2011) Increasing the metrological autonomy of local measurement systems. Collection of scientific works of the Kharkiv Air Force University. Issue 1 (27). P. 222–225.

7. Mykiychuk, M., Stolyarchuk, P., Bubela, T. Main tasks and features of metrological quality assurance of products. https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/3848/vtm74st20.pdf [in Ukrainian].

8. Volodarsky, E. T., Kukharchuk, V. V., Podzharenko, V. O., Serdyuk, G. B. (2001) Metrological support of measurements and control: a manual. Vinnytsia: VDTU. 2019 p. https://iq.vntu.edu.ua/repository/getfile.php/131.pdf [in Ukrainian].

9. Kononov, V. B., Burtseva, V. V. (2017) Mathematical models for determining the number of orders for guaranteed metrological maintenance of weapons and military equipment samples, taking into account their importance. Information processing systems. Issue 1 (147). P. 88–92.

10. Kononov, V. B., Naumenko, A. M., Vodolazhko, O. V., Koval, O. V., Kondrashova, I. I. (2017) Fundamentals of operation of military measuring equipment in the conditions of ATO. Kharkiv: KhNUPS. P. 288.

11. Kuchuk, G. A. (2007) Traffic management of a multi-service distributed telecommunication network. Control, navigation and communication systems. K.: TsNII NiU. Issue 2. P. 18–27.

12. Kononov, V. B., Naumenko, A. M., Koval, O. V. (2018) Application of electrical measurements by measuring equipment in the conditions of ATO: training manual. Kharkiv: KhNUPS. 392 p.

13. Kuchuk, G. A., Kovalenko, A. A., Lukova-Chuyko, N. V. (2017) Method for minimizing the average packet delay in virtual connections of the cloud service support network. Control, navigation and communication systems. Issue 2(42). P. 117–120.

14. Kuznetsov, I. B., Martsenkivskyi, V. T., Yaroshenko, O. V., Buyalo, O. V., Protsenko, V. O. (2011) Improvement of the fleet of mobile laboratories of measuring equipment as a factor in increasing the efficiency and effectiveness of metrological maintenance of complex systems. Collection of scientific papers of KNU. Issue 32. P. 33–46.

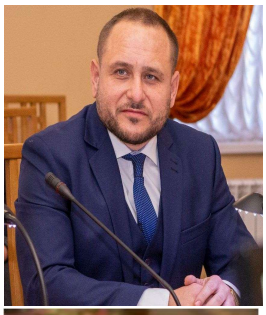
15. On metrology and metrological activities. Law of Ukraine. Document 1314-VII dated 15.11.2024. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text [in Ukrainian].

16. On approval of the Technical Regulations for Measuring Instruments. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated February 24, 2016 № 163. Document 163-2016-p dated 27.09.2024. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/163-2016-п#Text [in Ukrainian].

УДК 528.4:332.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-206-212**
UDC 528.4:332.3

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ

ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF LAND USE OF REGIONS



Мамонов Костянтин Анатолійович, *доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0002-0797-2609



Гой Василь Васильович, *кандидат економічних наук, докторант кафедри економіки та маркетингу, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e- mail: vasssgoi@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0003-1822-4478



Радзінська Юлія Борисівна, *кандидат технічних наук, доцент кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: radzinskayayb@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-1661-7975



Штерндок Ернест Сергійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: shterndok@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-1107-7401

Анотація. Доведена актуальність теми дослідження. Для оцінки ефективності використання земель регіонів застосовуються підходи: індикативний; коефіцієнтний; потенційний; функціональний; індексний; просторовий; соціально-економічний; системний.

Досягнута мета відносно розробки теоретико-методичного підходу до оцінки рівня ефективності використання земель регіонів. Досягнення мети здійснюється шляхом виконання завдань: характеристика напрямів оцінки рівня ефективності використання земель регіонів; виокремлення показників оцінки; розробка моделі для оцінки рівня використання земель регіонів.

У результаті дослідження обґрунтовані підходи до оцінки рівня використання земель регіонів. Запропоновано теоретико-методичний підхід до оцінки рівня використання земель регіонів, який базується на сукупності напрямів, методах, моделях, що надає можливості сформувати кількісну основу для моделювання змін у землекористуванні й прийняття рішень. Розроблена інтегральна модель оцінки рівня ефективності використання земель, яка включає функціональні, економічні, просторові, екологічні, інвестиційні, стейкхолдерні показники та вагові коефіцієнти, що дозволило отримати узагальнену оцінку. Встановлено, що у більшості регіонів ефективність використання земель знаходиться на посередньому рівні. Найнижчими рівнями ефективності використання земель визначались Донецький і Луганський регіони, що пов'язано із ведення бойових дій. Знижується рівень ефективності використання земель у прифронтових регіонах. Високим посереднім рівнем використання земель характеризуються Київський та Львівський регіони.

Ключові слова: ефективність, використання земель, регіони, оцінка, територіальний розвиток, геоінформаційні системи, земельні відносини, інструментарій математичного моделювання.

Вступ. Використання земель є комплексним процесом, що впливає на регіональний розвиток. Земля є основним і важливим елементом, що впливає на соціально-економічні умови життєдіяльності населення. Поряд з цим, за останні роки відбувається уповільнення рівня ефективності використання земель. Особливо це проявляється у прифронтових і регіонах, де ведуться бойові дії. Знижуються вартісні та інвестиційні параметри земель, виникають певні проблемні питання відносно взаємодії стейкхолдерів.

Сформована нормативна база, що забезпечує розвиток земельних відносин: Земельний кодекс України, Кодекс України про адміністративні правопорушення, Кримінальний кодекс України, Закони України «Про державний контроль за використанням та охороною земель», «Про охорону земель», «Про основні засади державного нагляду (контролю) у сфері господарської діяльності», Постанови Кабінету міністрів України «Про розміри та порядок визначення втрат сільськогосподарського і лісогосподарського виробництва», «Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності, пов'язаної з використанням та охороною земель, і визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) Державною службою з питань геодезії, картографії та кадастру» Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України «Про затвердження уніфікованої форми акта, що складається за результатами проведення планового (позапланового) заходу державного нагляду (контролю) щодо додержання суб'єктом господарювання вимог законодавства у сфері використання та охорони земель».

Формування земельних відносин, забезпечення ефективності використання земель впливають на територіальний розвиток. Для прийняття рішень у сфері земельних відносин необхідно сформувати кількісну основу шляхом застосування інструментарію математичного моделювання. Крім того, актуальним питанням є моделювання розподілу та використання земель на регіональному рівні із застосуванням геоінформаційних систем.

Таким чином, тема дослідження відносно оцінки ефективності використання земель регіонів є актуальною, а її розробка має своєчасний характер.

Огляд існуючих теоретичних розробок. В існуючих наукових розробках запропоновані різні підходи до оцінки ефективності використання земель регіонів. Зокрема, запропоновано комплексний показник оцінки ефективності використання земель через призму: вагових коефіцієнтів, що визначають значимість показників; розмір землекористування у відповідному році; одержано на 100 га сільськогосподарських угідь товарної продукції у відповідному році; одержано на 100 га сільськогосподарських угідь прибутку (збитку) у відповідному році; рівень рентабельності у відповідному році; припадає на одного працівника сільськогосподарських угідь у відповідному році; розмір землекористування; одержано на 100 га сільськогосподарських угідь товарної продукції; одержано на 100 га сільськогосподарських угідь прибутку (збитку); рівень рентабельності; припадає на одного працівника сільськогосподарських угідь [1]. Реалізовано індексний підхід до оцінки

ефективності використання земель [2]. Визначається індекс стану земельних ресурсів, який охоплює інформацію про різні сфери земельних відносин [3].

При оцінці ефективності використання земель враховуються обмеження й обтяження на земельні ділянки [4, 5].

Системний підхід до оцінки ефективності використання земель реалізується через призму: природних, структурних, технічних, технологічних, економічних, витратних, соціальних, екологічних, енергетичних інвестицйіних показників [6–10].

Через потенційні можливості визначається ефективність використання земель у роботах Матвєєва П., Христенко О. [11, 12].

Рівень інтенсивності використання земель оцінюється на основі показників:

– ступінь господарського використання землі;
– ступінь розораності;
– ступінь меліорованості;
– питома вага інтенсивних культур у загальній посівній площі підприємства;
– коефіцієнт повторного використання землі [13]

Узагальнюючи вищенаведене, для оцінки ефективності використання земель регіонів застосовуються підходи: індикативний, коефіцієнтний, потенційний, функціональний, індексний, просторовий, соціально-економічний, системний.

Метою дослідження є розробка теоретико-методичного підходу до оцінки рівня ефективності використання земель регіонів. Досягнення мети здійснюється шляхом виконання наступних завдань:

– характеристика напрямів оцінки рівня ефективності використання земель регіонів;
– виокремлення показників оцінки;
– розробка моделі для оцінки рівня використання земель регіонів.

Виклад основного матеріалу. Визначені напрями оцінки рівня ефективності використання земель регіонів:

– формування інформаційно-аналітичного забезпечення щодо використання земель регіонів;
– визначення просторових характеристик земель;
– виокремлення чинників використання земель регіонів;
– побудова багаторівневої системи показників оцінки рівня використання земель регіонів;
– визначення локальних чинників використання земель із застосуванням експертних і аналітичних методів;
– оцінка системних показників оцінки із використанням моделі середньої геометричної;
– розробка інтегральної моделі оцінки рівня ефективності використання земель регіонів;
– оцінка вагових коефіцієнтів із застосуванням методу аналізу ієрархій;
– оцінка інтегрального показника рівня ефективності використання земель регіонів;
– інтерпретація отриманих результатів.

Виокремлені показники для оцінки рівня ефективності використання земель регіонів: функціональні (UL_1), економічні (UL_2), просторові (UL_3), екологічні (UL_4), інвестиційні (UL_5), стейкхолдерні (UL_6).

Розроблена модель для оцінки інтегрального показника оцінки рівня ефективності використання земель регіонів:

$$I_{UL} = UL_1 * k_1 + UL_2 * k_2 + UL_3 * k_3 + UL_4 * k_4 + UL_5 * k_5 + UL_6 * k_6, \quad (1)$$

де I_{UL} – інтегральний показник оцінки рівня ефективності використання земель регіонів, відн. од.;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – вагові коефіцієнти, що характеризують вплив на інтегральний показник і взаємний вплив функціональних, економічних, просторових, екологічних, інвестиційних, стейкхолдерних чинників, відн. од.

Розроблена шкала, що характеризує рівень ефективності використання земель регіонів залежно від значень інтегрального показника (табл. 1).

Таблиця 1 – Шкала, що характеризує рівень ефективності використання земель регіонів залежно від значень інтегрального показника, відн. од.

Table 1 – A scale that characterizes the level of efficiency of land use of the regions depending on the values of the integral indicator, units

Значення інтегрального показника	Рівень використання земель
0	Не сформовані земель відносини на регіональному рівні
1	Низький рівень використання земель
2	Несуттєвий
3	Незначний
4	Низький посередній
5	Посередній
6	Високий посередній
7	Значний
8	Суттєвий
9	Високий
10	Абсолютний

Результати оцінки інтегрального показника оцінки рівня ефективності використання земель регіонів представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати оцінки інтегрального показника оцінки рівня ефективності використання земель регіонів, відн. од.

Table 2 – Results of assessment of integral indicator of evaluation of the level of efficiency of land use of regions, units

Регіони	Значення показника
Вінницький	5,02
Волинський	4,3
Дніпропетровський	5,78
Донецький	0,4
Житомирський	4,41
Закарпатський	5,67
Запорізький	2,45
Івано-Франківський	5,04
Київський	6,23
Кіровоградський	5,02
Луганський	0,01
Львівський	6,12
Миколаївський	3,76
Одеський	5,01
Полтавський	4,87
Рівненський	4,32
Сумський	2,98
Тернопільський	4,94
Харківський	2,79
Херсонський	2,11
Хмельницький	4,86
Черкаський	4,55
Чернівецький	4,95
Чернігівський	4,25

Висновки. У результаті дослідження обґрунтовані підходи до оцінки рівня використання земель регіонів. Запропоновано теоретико-методичний підхід до оцінки рівня використання земель регіонів, який базується на сукупності напрямів, методах, моделях, що надає можливості сформувати кількісну основу для моделювання змін у землекористуванні й прийняття рішень. Розроблена інтегральна модель оцінки рівня ефективності використання земель, яка включає функціональні, економічні, просторові, екологічні, інвестиційні, стейкхолдерні показники та вагові коефіцієнти, що дозволило отримати узагальнену оцінку. Встановлено, що у більшості регіонів ефективність використання земель знаходиться на посередньому рівні. Найнижчими рівнями ефективності використання земель визначались Донецький і Луганський регіони, що пов'язано із ведення бойових дій. Знижується рівень ефективності використання земель у прифронтових регіонах. Високим посереднім рівнем використання земель характеризуються Київський та Львівський регіони.

Перелік посилань

1. Ряснянська А. М. Оцінка ефективності використання земель сільськогосподарських підприємств. Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство. 2006. Випуск 8. частина 2. С. 65–69. URL: http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/8_2_2016ua/18.pdf
2. Будзяк О. С., Будзяк В. М. Ефективне використання земель України: аналіз, динаміка та регіони з найбільш затребуваним попитом на інноваційні агропроекти. Ефективна економіка. 2020. № 4. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4_2020/17.pdf
3. Нізалов Д., Яремко В. Оцінка стану земельних відносин для міст та районів України. Проект «Підтримка реформ у сільському господарстві та земельних відносинах в Україні». 2017. URL: https://ukraine-landpolicy.com/wp-content/uploads/2016/03/Ranking_UA_March_29.03.pdf
4. Бабушкіна Р., Мацієвич Т. Оцінка ефективності використання земель об'єднаних територіальних громад із врахуванням встановлених зон обмежень. Вісник Тернопільського національного економічного університету. 2020. № 4. С. 25–34. URL: http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/41020/1/Бабушкіна.pdf
5. Ступень М., Радомський С., Таратута Р. Ефективність використання сільськогосподарських земель в аграрному секторі Закарпатської області. Економіст. 2011. № 2. С. 30–32.
6. Дем'яненко С. Менеджмент аграрних підприємств: навч.посібник. Київ: КНЕУ, 2005. 347 с.
7. Чернецька О. Методичні підходи до визначення ефективності витрат сільськогосподарських підприємств в управлінському обліку. Актуальні проблеми розвитку економіки регіону. 2011. Вип. 7(1). С. 188–195. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aprer_2011_7(1)_35
8. Гуторов О. Оцінка земельних ресурсів та ефективності інвестицій : монографія. Харків, 2006. 368 с.
9. Черевко Г., Іваницька Г. АПК: оцінка реформування та перспективи розвитку. Вісник аграрної науки. 2001. № 14(1). С. 14–19.
10. Дворецький А. Методичний підхід до визначення соціально-економічної ефективності використання земельних ресурсів. Ефективна економіка. 2013. № 5. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2013_5_28
11. Матвєєв П. Закономірності раціонального відтворення ресурсного потенціалу, як умова ефективного функціонування аграрного підприємства. Bulletin of Sumy National Agrarian University. 2019. №4 (82). С. 52–57. URL: https://doi.org/10.32845/bsnau.2019.4.10
12. Христенко О. А., Минів Р. М. Кучеренко В. І. Ефективність використання земельного потенціалу: теоретичний і практичний аспекти. Modern Economics. 2024. № 44(2024). С. 221–225. DOI: https://doi.org/10.31521/modecon.V44(2024)-32
13. Андрійчук В. Г. Економіка підприємств агропромислового комплексу: підручник. Київ: КНЕУ. 2013. 779 с.

ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF LAND USE OF REGIONS

Mamonov Kostiantyn A., Doctor of Economic Sciences, Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com, tel. +380992917354, http://orcid.org/0000-0002-0797-2609

Goi Vasyl V., PhD (Candidate of Economic Science), Doctoral Candidate at the Department of Economics and Marketing, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail: vasssgoi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1822-4478

Radzinska Yuliia B., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: radzinskayayb@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1661-7975

Shterndok Ernest S., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: shterndok@ukr.net, tel. +380934289234, https://orcid.org/0000-0003-1107-7401

Summary. The relevance of the research topic has been proven. To evaluate the efficiency of land use of regions, approaches are used: indicative; coefficient; potential; functional; index; spatial; socio-economic; System.

The goal has been achieved regarding the development of a theoretical and methodological approach to evaluating the level of efficiency of land use of region. The goal is achieved by fulfilling the tasks: characterization of directions of assessment of the level of efficiency of land use of regions; separation of evaluation indicators; Development of a model for assessing the level of land use of regions.

As a result of the study, approaches to assessing the level of land use of regions are substantiated. The theoretical and methodological approach to assessing the level of land use of regions, which is based on a set of directions, methods, models, which allows to form a quantitative basis for modeling changes in land use and decision making. An integral model of assessing the level of efficiency of land use, which includes functional, economic, spatial, environmental, investment, stakeholder indicators and weight ratios, which allowed to obtain a generalized assessment. It is established that in most regions, land efficiency is at a mediocre level. The lowest levels of land efficiency were determined by Donetsk and Lugansk regions, which is related to combat. The level of efficiency of land use in the frontal regions is reduced. The high mediocre level of land use is characterized by Kyiv and Lviv regions.

Keywords: efficiency, land use, regions, assessment, territorial development, geoinformation systems, land relations, tools of mathematical modeling.

References

1. Ryasnyanskaya, A. M. (2006) Assessment of efficiency of land use of agricultural enterprises. Scientific Bulletin of Uzhgorod National University. Series: international economic relations and world economy. Issue 8. Part 2. P. 65–69. http://www.visnyk-conom.uzhnu.uz.ua/archive/8_2_2016ua/18.pdf [in Ukrainian].

2. Budziak, O. S., Budziak, V. M. (2020) Effective use of the lands of Ukraine: analysis, dynamics and regions with the most popular demand for innovative agro -projects. Effective economy. № 4. http://www.conmyy.nayka.com.ua/pdf/4_2020/17.pdf [in Ukrainian].

3. Nizalov, D., Yaremko, V. (2017) Assessment of the state of land relations for cities and districts of Ukraine. Project «Supporting reforms in agriculture and land relations in Ukraine». https://ukraine-landPolicy.com/wp-content/uploads/2016/03/ranking_ua_march_March_29.03.pdf [in Ukrainian].

4. Babushkina, R., Matsievich, T. (2020) Assessment of the efficiency of land use of united territorial communities, taking into account the established zones of restrictions. Bulletin of Ternopil National Economic University. № 4. P. 25–34. http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/41020/1/babushkina.pdf [in Ukrainian].

5. Stupen, M., Radomskyy, S., Taratuta, R. (2011) Efficiency of use of agricultural lands in the agrarian sector of Transcarpathian region. Economist. № 2. P. 30–32.

6. Demyanenko, S. (2005) Management of agricultural enterprises: a textbook. Kyiv: KNEU, 347 p.

7. Chernetska, O. (2011) Methodical approaches to determining the cost efficiency of agricultural enterprises in management accounting. Actual problems of development of economy of the region. Iss. 7 (1). P. 188–195. http://nbuv.gov.ua/ujrn/aper_2011_7_7(1)_35 [in Ukrainian].

8. Gutorov, O. (2006) Valuation of land resources and investment efficiency: monograph. Kharkiv, 368 p.

9. Cherevko, G., Ivanytska, G. (2001) APK: assessment of reform and prospects of development. Bulletin of agrarian science. № 14 (1). P. 14-19.

10. Dvoretsky, A. (2013) Methodical approach to determining the socio-economic efficiency of land use. Effective economy. № 5. http://nbuv.gov.ua/enFek_2013_5_28 [in Ukrainian].

11. Matveev, P. (2019) Patterns of rational reproduction of resource potential as a condition for the effective functioning of an agricultural enterprise. Bulletin of Sumy National Agrarian University. №4 (82). P. 52–57. https://doi.org/10.32845/bsnau.2019.4.10 [in Ukrainian].

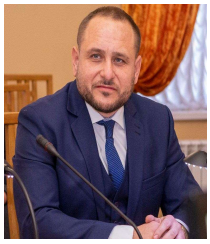
12. Khristynko, O. A., Miniv, R. M., Kucherenko, V. I. (2024) Efficiency of use of land potential: theoretical and practical aspects. Modern Economics. № 44 (2024). P. 221–225. https://doi.org/10.31521/modecon.v444(2024)-32 [in Ukrainian].

13. Andriychuk, V. G. (2013) Economy of enterprises of the agro -industrial complex: a textbook. Kyiv: KNEU. 779 p.

УДК 528.4:332.3
UDC 528.4:332.3

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-213-219

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ У МІСТОБУДІВНОМУ МОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД: ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ
APPLICATION OF GEOINFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES IN URBAN PLANNING MONITORING OF TERRITORIAL COMMUNITIES: THEORETICAL PRINCIPLES



Мамонов Костянтин Анатолійович, *доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0002-0797-2609



Радзінська Юлія Борисівна, *кандидат технічних наук, Доцент кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e- mail: radzinskayayb@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-1661-7975



Фролов Вячеслав Олександрович, *кандидат технічних наук, асистент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: frolgis@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-8045-3963



Євдокімов Андрій Анатолійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: akim050776@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-7538-8922



Штерндок Ернест Сергійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: shterndok@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-1107-7401

Анотація. Визначено, що у сучасних умовах розвитку інформаційних технологій, зростання обсягів просторових даних та ускладнення завдань управління територіями територіальних громад, зокрема впливу наслідків агресії РФ, постає необхідність впровадження інноваційних інструментів, які дозволяють забезпечити комплексний підхід до містобудівного моніторингу. Містобудівний моніторинг є важливим компонентом системи управління розвитком територій, оскільки забезпечує своєчасне отримання інформації про стан і зміни просторових об'єктів, що дає змогу приймати обґрунтовані рішення на різних рівнях управління.

Досягнута мета дослідження відносно обґрунтування теоретичних положень щодо застосування геоінформаційних систем і технологій у містобудівному моніторингу територіальних громад для зростання ефективності управління земельними ресурсами. Задачами дослідження є: визначення моніторингу земель територіальних громад; характеристика містобудівного моніторингу територіальних громад; визначення можливостей геоінформаційних систем і технологій для забезпечення управління земельними ресурсами територіальних громад.

У результаті систематизації теоретичних підходів до обґрунтування моніторингу земель запропоновано його визначення, яке характеризується сукупністю правових, конструктивних, комплексних, організаційних, функціональних та інструментальних напрямів, спрямованих на формування інформаційно-аналітичного й просторового забезпечення щодо стану та рівня використання земель із застосуванням методів математичного моделювання й геоінформаційних систем і технологій, що створює кількісну основу для перманентного відстеження та контролю за рухом земельних ресурсів й ефективного управління у сфері земельних відносин.

Містобудівний моніторинг територіальних громад є комплексним процесом спостереження, аналізу та оцінки стану і змін просторових об'єктів і територій у межах населених пунктів і прилеглих зон. Він слугує невід'ємним елементом системи управління територіями, забезпечуючи інформаційне підґрунтя для розробки, коригування та реалізації містобудівної документації.

Основним завданням містобудівного моніторингу є забезпечення безперервного та оперативного доступу до актуальних даних про стан забудови, інфраструктури, природних ресурсів, земельних ділянок та інших компонентів просторової організації земель територіальних громад. Вони включають аналіз не тільки фізичних змін у середовищі, але й соціально-економічних процесів, які впливають на розвиток громади.

Використання технологій ГІС дозволяє значно підвищити ефективність містобудівного моніторингу та управління територіями. Вибір програмного продукту залежить від наявних ресурсів, технічних вимог і специфіки поставлених завдань. У поєднанні з іншими сучасними технологіями ГІС стають основою для інтегрованого підходу до планування, моніторингу та розвитку територій територіальних громад, забезпечення управління земельними ресурсами.

Ключові слова: геоінформаційні системи, геоінформаційні технології, моделювання об'єктів нерухомості, комплексні плани просторового розвитку, територіальні громади, моніторинг, містобудівний моніторинг, управління земельними ресурсами.

Вступ. У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій, зростання обсягів просторових даних та ускладнення завдань управління територіями територіальних громад, зокрема впливу наслідків агресії РФ, постає необхідність впровадження інноваційних інструментів, які дозволяють забезпечити комплексний підхід до містобудівного моніторингу. Містобудівний моніторинг є важливим компонентом системи управління розвитком територій, оскільки забезпечує своєчасне отримання інформації про стан і зміни просторових об'єктів, що дає змогу приймати обґрунтовані рішення на різних рівнях управління.

За останні роки відбувається зростання значення геоінформаційних систем і технологій (ГІС) для моделювання об'єктів нерухомості та розробки й реалізації комплексних планів просторового розвитку територіальних громад. У цьому контексті слід відзначити сформовану систему законодавчого забезпечення: Закони України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних», Постанова Кабінету міністрів України «Про затвердження Порядку функціонування

національної інфраструктури геопросторових даних». Вирішення проблематики управління земельними ресурсами територіальних громад, характеристика відповідних напрямів визначена у нормативно-правових документах: Закони України «Про добровільне об'єднання територіальних громад», «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо вдосконалення системи управління та дерегуляції у сфері земельних відносин», Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Класифікації обмежень у використанні земель, що можуть встановлюватися комплексним планом просторового розвитку території», «Про визначення формату електронних документів комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади, генерального плану населеного пункту, детального плану території», «Деякі питання надання субвенції з державного бюджету місцевим бюджетам на розроблення комплексних планів просторового розвитку територій територіальних громад».

Актуальним питанням є впровадження моніторингових процедур у систему управління земельними ресурсами територіальних громад, застосовуючи геоінформаційні системи і технології.

Формування сучасної системи землекористування територіальних громад залужить від концептуальних положень відносно визначення моніторингу територій.

Отже, тема дослідження щодо застосування геоінформаційних систем і технологій у містобудівному моніторингу територіальних громад для зростання ефективності управління земельними ресурсами є важливою і актуальною задачею.

Огляд існуючих теоретичних розробок. Теоретичні положення до визначення моніторингу земель характеризуються різноаспектністю підходів. Зокрема, моніторинг земель визначається як истема спостереження за станом земель з метою своєчасного виявлення змін, їх оцінки, відвернення та ліквідації наслідків негативних процесів [1].

Моніторинг земель здійснюється на державному, регіональному і локальному рівнях. На функціональних напрямах здійснення моніторингу зосереджується увага у [2–4].

Сучасні інструменти здійснення моніторингу представлені у роботах авторів [5–8].

Проблемні питання визначення моніторингу земель охарактеризовані у розробках [9–11].

Узагальнюючи існуючи теоретичні положення, визначені підходи до формування та застосування моніторингу земель:

– конструктивний;
– комплексний;
– організаційний;
– функціональний.

Вони визначають напрями, рівень використання, особливості землекористування, інструменти здійснення моніторингу.

У результаті систематизації теоретичних підходів до обґрунтування моніторингу земель запропоновано його визначення, яке характеризується сукупністю правових, конструктивних, комплексних, організаційних, функціональних та інструментальних напрямів, спрямованих на формування інформаційно-аналітичного й просторового забезпечення щодо стану та рівня використання земель із застосуванням методів математичного моделювання й геоінформаційних систем і технологій, що створює кількісну основу для перманентного відстеження та контролю за рухом земельних ресурсів й ефективного управління у сфері земельних відносин.

Метою дослідження є обґрунтування теоретичних положень щодо застосування геоінформаційних систем і технологій у містобудівному моніторингу територіальних громад для зростання ефективності управління земельними ресурсами. Задачами дослідження є:

– визначення моніторингу земель територіальних громад;
– характеристика містобудівного моніторингу територіальних громад;
– визначення можливостей геоінформаційних систем і технологій для забезпечення управління земельними ресурсами територіальних громад.

Виклад основного матеріалу. Містобудівний моніторинг територіальних громад є комплексним процесом спостереження, аналізу та оцінки стану і змін просторових об'єктів і територій

у межах населених пунктів і прилеглих зон. Він слугує невід'ємним елементом системи управління територіями, забезпечуючи інформаційне підґрунтя для розробки, коригування та реалізації містобудівної документації.

Основним завданням містобудівного моніторингу є забезпечення безперервного та оперативного доступу до актуальних даних про стан забудови, інфраструктури, природних ресурсів, земельних ділянок та інших компонентів просторової організації земель територіальних громад. Вони включають аналіз не тільки фізичних змін у середовищі, але й соціально-економічних процесів, які впливають на розвиток громади.

Цілі містобудівного моніторингу можна узагальнити у наступних складових:

– забезпечення ефективного управління територіями – отримання актуальної інформації для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо розвитку інфраструктури, планування забудови та охорони довкілля територіальної громади;

– контроль за виконанням містобудівної документації – забезпечення відповідності фактичних змін на території положенням генерального плану, детальних планів територій та іншої планувальної документації територіальної громади;

– оцінка впливу змін на сталий розвиток громади – визначення наслідків змін у використанні територій, оцінка ефективності заходів з просторового планування та прогнозування подальшого розвитку територій.

Завдання містобудівного моніторингу територіальних громад включають:

– систематичний збір та оновлення інформації про забудову, мережі, природні ресурси та землекористування;

– аналіз динаміки змін у стані об'єктів і територій для виявлення тенденцій та потенційних проблем;

– забезпечення інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень у сфері містобудування;

– надання рекомендацій для коригування містобудівної документації на основі фактичних даних;

– створення основи для розробки стратегій розвитку територій та інтеграції планувальних процесів у загальну систему управління громадами.

Таким чином, містобудівний моніторинг територіальних громад є інструментом для досягнення збалансованого розвитку територій, забезпечення їх функціональності, безпеки, екологічної стійкості, просторового розвитку. Ефективне виконання цих завдань можливе лише за умови застосування сучасних технологій, зокрема геоінформаційних систем і технологій, які дозволяють оптимізувати процеси збору, обробки та аналізу даних. Результати містобудівного моніторингу можуть застосовувати для розробки комплексних планів просторового розвитку територіальних громад.

Геоінформаційні системи і технології є сучасним інструментами для управління, аналізу та візуалізації просторових даних, що робить їх актуальними технологіями у містобудівному моніторингу та управлінні територіями. Їх основна функція полягає у поєднанні графічної та аналітичної складових, які дозволяють ефективно працювати з геопросторовими даними для вирішення широкого спектра завдань, пов'язаних із плануванням і використанням територій.

Слід відзначити основні можливості ГІС у цьому контексті:

– обробка та управління геоданими – ГІС дозволяють збирати, зберігати, структурувати та управляти великими обсягами просторових і атрибутивних даних. Ці дані можуть включати карти, аерофотознімки, дані дистанційного зондування та інформацію про інженерну інфраструктуру;

– аналіз просторових даних – ГІС забезпечують інструменти для просторового аналізу, включаючи буферний аналіз, побудову теплових карт, моделювання видимості, аналіз потоків і щільності населення. Такі можливості дозволяють виявляти залежності, оцінювати ризики та прогнозувати розвиток територій;

– візуалізація даних – ГІС забезпечують створення карт, 3D-моделей та інших засобів візуалізації, що сприяє більш доступному та наочному представленню інформації для різних аудиторій, включаючи керівників громад, фахівців та громадськість;

– автоматизація процесів – ГІС-програми дозволяють автоматизувати рутинні завдання, наприклад, обробку даних або підготовку звітів, що суттєво підвищує продуктивність роботи;

Особливу увагу варто звернути на такі популярні ГІС-програми, як QGIS та ArcGIS, які широко використовуються для аналізу та управління територіями.

QGIS – це безкоштовна та відкрита платформа, яка забезпечує широкий набір інструментів для роботи з геоданими. Її основні переваги:

– підтримка великої кількості форматів даних, включаючи растрові, векторні та бази даних;

– наявність великої кількості плагінів для розширення функціональності, таких як аналіз мереж, інструменти дистанційного зондування та 3D-візуалізація;

– зручність використання в умовах обмежених фінансових ресурсів завдяки відкритій ліцензії.

ArcGIS – це комерційна платформа, яка пропонує передові можливості для аналізу та управління територіями, серед яких:

– інтегровані інструменти для глибокого просторового аналізу, зокрема інтерполяція, створення моделей рельєфу та просторове моделювання;

– висока якість картографічного оформлення та підтримка інтеграції з іншими системами, включаючи веб-сервіси та мобільні додатки;

– доступ до великої кількості базових карт і готових рішень через ArcGIS Online, що спрощує виконання багатьох завдань.

Висновки. Таким чином, використання технологій ГІС дозволяє значно підвищити ефективність містобудівного моніторингу та управління територіями. Вибір програмного продукту залежить від наявних ресурсів, технічних вимог і специфіки поставлених завдань. У поєднанні з іншими сучасними технологіями ГІС стають основою для інтегрованого підходу до планування, моніторингу та розвитку територій територіальних громад, забезпечення управління земельними ресурсами.

Перелік посилань

1. Земельний кодекс України. Документ 2768-III. Редакція від 01.01.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text

2. Аніщенко В. О., Боровий В. О. Моніторинг і охорона земель: навч. посіб. Чернігів: Чернігівські обереги, 2006. 208 с.

3. Веремеєнко С. І. Охорона ґрунтів та відновлення їх родючості: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2010. 219 с.

4. Веремеєнко С. І., Трушева С. С. Моніторинг ґрунтів: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2010. 227 с.

5. Куссуль Н. М. Геоінформаційна інфраструктура моніторингу навколишнього середовища та надзвичайних ситуацій. Наука та інновації. 2010. Т. 6. № 4. С. 13–20.

6. Медведєв В. В. Родючість ґрунтів: моніторинг та управління. Київ: Урожай, 1992. 248 с.

7. Мошинський В. С., Сасюк З. К. Просторова екстраполяція у задачах відтворення даних моніторингу. Рівне: НУВГП, 2010. 184 с.

8. Stribling J. B., Davie S. R. Design of an environmental monitoring programme for the Lake Allatoona. Upper Etowah river watershed. Proceedings of the 2005 Georgia Water Resources Conference, April 25–27, 2005.

9. Маланчук М., Панас Р. Сучасні проблеми здійснення моніторингу грунтового покриву в Україні. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2013. Вип. 78. С. 201–204.

10. Петлюк Ю. С. Правові аспекти здійснення моніторингу земель в Україні. Вісник Академії адвокатури України. 2011. № 2 (21). С. 246–247.

11. Дорош О. С. Інвентаризація земель: методичні підходи до її проведення. Агросвіт. 2015. № 11. С. 24–30.

APPLICATION OF GEOINFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES IN URBAN PLANNING MONITORING OF TERRITORIAL COMMUNITIES: THEORETICAL PRINCIPLES

Mamonov Kostiantyn A., Doctor of Economic Sciences, Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com, tel. +380992917354, http://orcid.org/0000-0002-0797-2609

Radzinska Yuliia B., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: radzinskayayb@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1661-7975

Frolov Viacheslav O., Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: frolgis@gmail.com, тел. +380509816112, https://orcid.org/0000-0001-8045-3963

Yevdokimov Andrey A., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: akim050776@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7538-8922

Shterndok Ernest S., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: shterndok@ukr.net, tel. +380934289234, https://orcid.org/0000-0003-1107-7401

Summary. It is determined that in the current conditions of development of information technologies, the increase in the volume of spatial data and the complication of the tasks of management of territorial communities, in particular the impact of the consequences of aggression of the Russian Federation, there is a need to introduce innovative tools that allow to provide a comprehensive approach to town planning monitoring. Urban planning monitoring is an important component of the territorial development management system, since it provides timely information on the status and changes of spatial objects, which allows to make sound decisions at different levels of management.

The purpose of the study was achieved regarding the substantiation of theoretical provisions on the use of geoinformation systems and technologies in urban planning monitoring of territorial communities to increase the efficiency of land management. The tasks of the study are: determining the monitoring of land of territorial communities; characteristics of town planning monitoring of territorial communities; Determining the capabilities of geoinformation systems and technologies to ensure the management of land resources of territorial communities.As a result of the systematization of theoretical approaches to substantiation of land monitoring, its definition is proposed, which is characterized by a set of legal, constructive, complex, organizational, functional and instrumental directions aimed at the formation geoinformation systems and technologies that creates a quantitative basis for permanent tracking and control over the movement of land resources and effective management in the field of land relations.

Urban planning monitoring of territorial communities is a comprehensive process of observation, analysis and assessment of the status and changes of spatial objects and territories within settlements and adjacent zones. It serves as an integral part of the territory management system, providing an information basis for the development, adjustment and implementation of town planning documentation.

The main task of town planning monitoring is to ensure continuous and prompt access to current data on the state of development, infrastructure, natural resources, land plots and other components of spatial organization of land of territorial communities. They include analysis of not only physical changes in the environment, but also socio-economic processes that affect the development of the community.

The use of GIS technologies can significantly increase the efficiency of town planning monitoring and territorial management. The choice of software depends on the available resources, technical requirements and specifics of the tasks.In combination with other modern GIS technologies, they are the basis for an integrated approach to the planning, monitoring and development of territorial communities, and providing land management.

Keywords: Geoinformation systems, geoinformation technologies, modeling of real estate, integrated plans for spatial development, territorial communities, monitoring, urban planning, land resources management.

References

1. Land Code of Ukraine. Document 2768-III. Editorial from 01.01.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#text [in Ukrainian].

2. Anishchenko, V. O., Borovy, V. O. (2006) Monitoring and protection of land: textbook. Chernihiv: Chernihiv Charms, 208 p.

3. Veremyenko, S. I. (2010) Soil protection and restoration of their fertility: textbook. Rivne: NUCHP, 219 p.

4.Verameyenko, S. I., Trusheva, S. S. (2010) Monitoring of soils: textbook. Rivne: NUCHP, 227 p.

5.Kusul, N. M. (2010) Geoinformation infrastructure of environmental monitoring and emergency situations. Science and innovation. Vol. 6. № 4. Pp. 13–20.

6. Medvedev, V. V. (1992) Soil fertility: monitoring and management. Kyiv: Harvest, 248 p.

7. Moshinsky, V. S., Sasyuk, Z. K. (2010) Spatial extrapolation in the tasks of reproduction of monitoring data. Rivne: NUCHP, 184 p.

8. Stribling J. B., Davie S. R. (2005) Design of an environmental monitoring programme for the Lake Allatoona. Upper Etowah river watershed. Proceedings of the 2005 Georgia Water Resources Conference.

9.Malanchuk, M., Panas, R. (2013) Current problems of soil cover monitoring in Ukraine. Geodesy, Cartography and Aerial Photography. Issue 78. Pp. 201–204.

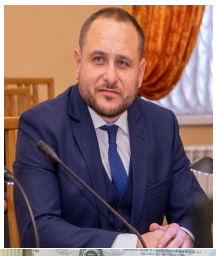
10. Petlyuk, Yu. S. (2011) Legal aspects of land monitoring in Ukraine. Bulletin of the Advocacy Academy of Ukraine. № 2 (21). Pp. 246–247.

11. Dorosh, O. S. (2015) Land inventory: methodological approaches to its implementation. Agrosvit. № 11. Pp. 24–30.

УДК 528.4:332.3
UDC 528.4:332.3

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-220-227

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ: НАПРЯМИ ТА ОСОБЛИВІСТЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
EFFICIENCY OF LAND USE OF THE REGIONS: DIRECTIONS AND PECULIARITY OF SECURITY



Мамонов Костянтин Анатолійович, *доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0002-0797-2609



Радзінська Юлія Борисівна, *кандидат технічних наук, Доцент кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: radzinskayayb@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-1661-7975



Штерндок Ернест Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: shterndok@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-1107-7401



Вяткін Роман Сергійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: viatkinr@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-8807-9988



Пеку Олена Андріївна*, студентка групи МЗУК-2024-2, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e- mail: olena.peku@kname.edu.ua*

https://orcid.org/0009-0009-8418-1294

Анотація. Визначена ефективність використання земель як системна категорія, що характеризується функціональними та просторовими параметрами, взаємодія яких регулюється нормативно-правовим інструментарієм із застосуванням геоінформаційних систем для забезпечення територіального розвитку регіонів.

Досягнута мета дослідження щодо визначення напрямів забезпечення ефективності використання земель регіонів. Вирішені завдання дослідження: охарактеризовані напрями забезпечення ефективності використання земель регіонів; виокремлені особливості забезпечення ефективності використання земель регіонів.

До напрямів забезпечення ефективності використання земель на регіональному рівні відносяться: формування інформаційно-аналітичного забезпечення щодо стану земельних відносин та земельного ранку регіонів; визначення просторових чинників, що впливають на землекористування на регіональному рівні; характеристика функціональних параметрів використання земель; оцінка типологічних складових використання земель на регіональному рівні; побудова шкали рівня забезпечення ефективності використання земель регіонів; розробка інтегральної моделі оцінки ефективності землекористування; оцінка інтегрального показника рівня забезпечення ефективності використання земель регіонів; інтерпретація отриманих результатів; розробка заходів для підвищення ефективності використання земель на регіональному рівні.

У результаті дослідження визначені напрями та особливості забезпечення ефективності використання земель на регіональному рівні. Обґрунтована теоретична основа визначення ефективності землекористування. Це дозволило запропонувати теоретико-методологічні засади й аналітико-практичний підхід до забезпечення ефективності земель на регіональному рівні. Визначена необхідність формування кількісної основи із застосуванням інструментарію математичного моделювання.

Ключові слова: ефективність, використання земель, регіони, напрями, особливості забезпечення, територіальний розвиток, геоінформаційні системи, земельні відносини, інструментарій математичного моделювання.

Вступ. Для забезпечення розвитку регіонів особливого значення має підвищення ефективності використання земель як важливого ресурсу, що впливає на трансформаційні процеси. За останні роки на регіональному рівні спостерігаються гальмування розвитку основних сфер діяльності, диспропорції та дисбаланси, екологічні проблеми, зниження безпекових параметрів.

У нормативних документах визначена важливість земель. Конституцією України визначено, що земля є основним національним багатством, що перебуває під особливою охороною держави. Право власності на землю гарантується. Це право набувається і реалізується громадянами, юридичними особами та державою виключно відповідно до закону [1]. Відповідно до Земельного кодексу України, земельні відносини - це суспільні відносини щодо володіння, користування і розпорядження землею.

Суб'єктами земельних відносин є громадяни, юридичні особи, органи місцевого самоврядування та органи державної влади. Об'єктами земельних відносин є землі в межах території України, земельні ділянки та права на них, у тому числі на земельні частки (паї). Земельне законодавство базується на таких принципах: поєднання особливостей використання землі як територіального базису, природного ресурсу і основного засобу виробництва; забезпечення рівності права власності на землю громадян, юридичних осіб, територіальних громад та держави; невтручання держави в здійснення громадянами, юридичними особами та територіальними громадами своїх прав щодо володіння, користування і розпорядження землею, крім випадків, передбачених законом; забезпечення раціонального використання та охорони земель; забезпечення гарантій прав на землю; пріоритету вимог екологічної безпеки [2].

У сучасних умовах використання земель в Україні не відповідає збалансованому природокористуванню, де виникають порушення між просторовими, екологічними, містобудівними, інвестиційними параметрами землекористування на регіональному рівні.

Встановлено, що сучасний стан земель характеризується наступними показниками: зареєстровано всього земель в державному земельному кадастрі – 44,9 млн. га. (74,4%); зареєстровано сільськогосподарських земель в державному земельному кадастрі – 33,0 млн. га. (77,2%); середня нормативна грошова оцінка ріллі 28 924 грн./га.; середньозважений розмір орендної плати за ділянки с/г призначення: комунальної власності (на земельних торгах) 8 458 грн./га.; середньозважена ціна купівлі-продажу ділянки сільськогосподарського призначення – 45 128 грн./га.; прокредитовано під заставу земель сільськогосподарського призначення площею – 15 460 га.; середня кількість угод купівлі-продажу на день в вересні 2024 р. – 327 од.; середній розмір земельної ділянки угоди купівлі-продажу – 2,24 га.; кількість укладених угод купівлі-продажу – 283 096 од.; площа зареєстрованих угод купівлі-продажу – 634 576 од. [3].

На думку експертів, за останні роки спостерігається гальмування розвитку ринку земель, уповільнення ефективності використання земель, що потребує переосмислення підходів до забезпечення ефективності землекористування на регіональному рівні [4].

Таким чином, тема дослідження щодо напрямів та особливостей забезпечення ефективності використання земель регіонів є актуальною.

Огляд існуючих теоретичних розробок. Визначено, що на сучасному етапі розвитку продуктивних сил земельні ресурси зумовлюють ефективність аграрного виробництва та гарантують забезпечення продовольчої, національної безпеки держави [5].

Ефективність використання земель є економічним результатом від використання сільськогосподарських земель, який характеризується відношенням отриманого ефекту (вираженого у натуральних та вартісних показниках) до площі з урахуванням якості та віддаленості земельної ділянки [6].

Функціональні аспекти використання земель, враховуючи їх вплив на територіальний розвиток, визначено у роботах [7, 8]. Більш того, визначені аспекти землекористування, що забезпечують територіальний розвиток [9–14].

На раціональному використанні земель зосереджують увагу [15, 16]. Ефективне використання земель у сільському господарстві характеризується як соціально-економічну категорію, що виражає відносини між людьми в процесі здійснення технологічних виробничих процесів, пов‘язаних з виробництвом сільськогосподарської продукції, з метою максимального задоволення потреб населення у продуктах харчування, при забезпеченні відновлення природної родючості ґрунту, збільшення продуктивного потенціалу земельних ресурсів і їх використання в умовах високого рівня екологічності як цих ресурсів, так і середовища в цілому [17].

Ефективність використання земель характеризується як системна категорія, що характеризується функціональними та просторовими параметрами, взаємодія яких регулюється нормативно-правовим інструментарієм із застосуванням геоінформаційних систем для забезпечення територіального розвитку регіонів.

Метою дослідження є визначення напрямів забезпечення ефективності використання земель регіонів. Завданнями дослідження є:

– характеристика напрямів забезпечення ефективності використання земель регіонів;
– виокремлення особливостей забезпечення ефективності використання земель регіонів.

Виклад основного матеріалу. Динаміка змін цін на землю сільськогосподарського призначення у 2024 р. (3 квартал порівняно з 1 кварталом) за регіонами представлена на рис. 1.

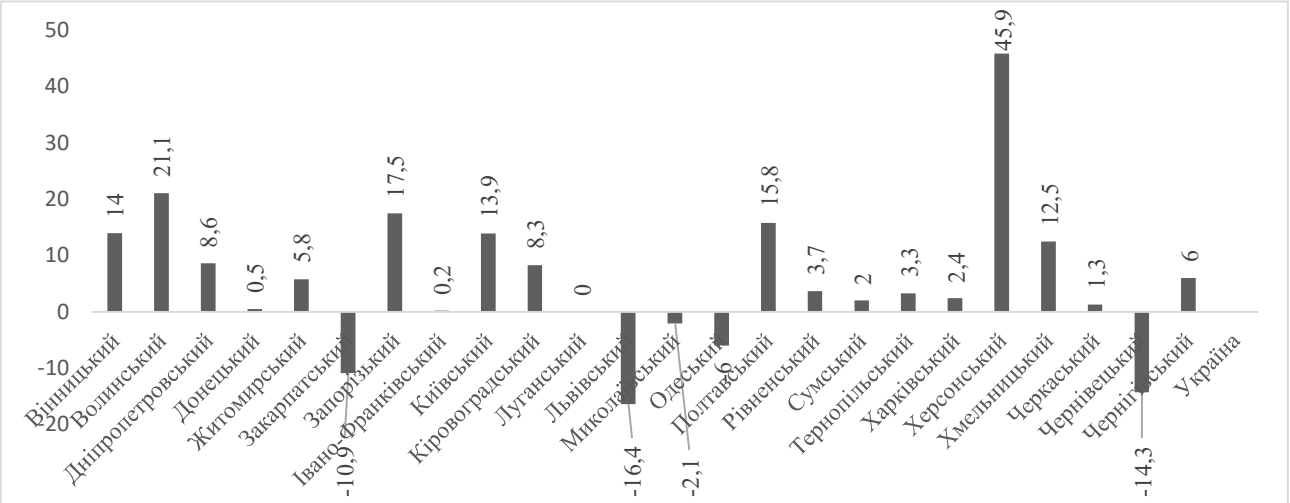


Рисунок 1 – Динаміка змін цін на землю сільськогосподарського призначення у 2024 р. (3 квартал порівняно з 1 кварталом) за регіонами, % за даними [3, 18].
Figure 1 – Dynamics of changes in agricultural land prices in 2024 (3 quarter compared to the 1st quarter) by regions, % according to data [3, 18].

За досліджений період відбувається зростання цін на землі сільськогосподарського призначення у більшості регіонів. Гальмують цей процес зниження цін у наступних регіонах: Закарпатському, Львівському, Миколаївському, Одеському та Чернівецькому.

изначено, що найнижчі середньозважені ціни у 2024 р. спостерігаються у регіонах, де відбуваються бойові дії або прифронтових областях: Донецькій – 35,2 тис. грн. / га.; Запорізькій – 34,7тис. грн. / га.; Херсонській – 37,2 тис. грн./ га.; Миколаївській – 35 тис. грн. / га.; Сумській – 34,7 тис. грн. / га. [3, 18].

До напрямів забезпечення ефективності використання земель на регіональному рівні відносяться:

– формування інформаційно-аналітичного забезпечення щодо стану земельних відносин та земельного ранку регіонів;
– визначення просторових чинників, що впливають на землекористування на регіональному рівні;
– характеристика функціональних параметрів використання земель;
– оцінка типологічних складових використання земель на регіональному рівні;
– побудова шкали рівня забезпечення ефективності використання земель регіонів;
– розробка інтегральної моделі оцінки ефективності землекористування;
– оцінка інтегрального показника рівня забезпечення ефективності використання земель регіонів;
– інтерпретація отриманих результатів;
– розробка заходів для підвищення ефективності використання земель на регіональному рівні.

До особливостей забезпечення ефективності землекористування відносяться необхідність врахування чинників, що враховують стан та земельні відносин у період ведення військових дій, можливостей повернення земель в господарський оборот у прифронтових регіонах. Крім того, забезпечення ефективності використання земель здійснюється через призму просторових та функціональних параметрів із можливостями моделювання об’єктів земельно-майнового комплексу із

застосуванням геоінформаційних систем. У контексті забезпечення ефективності використання земель регіонів формується кількісна основа із застосуванням інструментарію математичного моделювання.

Висновки. У результаті дослідження визначені напрями та особливості забезпечення ефективності використання земель на регіональному рівні. Обґрунтована теоретична основа визначення ефективності землекористування. Це дозволило запропонувати теоретико-методологічні засади й аналітико-практичний підхід до забезпечення ефективності земель на регіональному рівні. Визначена необхідність формування кількісної основи із застосуванням інструментарію математичного моделювання.

Перелік посилань

1. Конституція України. Документ 254к/96-ВР. Редакція від 01.01.2020. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр#Text
2. Земельний кодекс України. Документ 2768-III. Редакція від 01.01.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text
3. Земельний ринок в України. Аналітичний огляд за 3 квартал та вересень 2024 року. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/land_review_IIIq_ua.pdf
4. Груба Д. Земля та нерухомість: стан справ та перспективи 2024 року. URL: https://yur-gazeta.com/publications/practice/zemelne-agrarne-pravo/zemlya-ta-neruhomist-stan-sprav-ta-perspektivi-2024-roku.html
5. Паньків З. Екологічні проблеми землекористування в Україні. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2009. Вип. 37. С. 101–105. URL: http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/issue/view/100
6. Лазеба Є. С. Підвищення ефективності використання земель сільськогосподарського призначення в Україні. Ефективна економіка. 2014. № 5. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3062
7. Мельничук Л. С. Проблеми сталого та раціонального землекористування в Україні. Глобальні та національні проблеми економіки. 2014. Випуск 2. С. 910–914.
8. Третяк А. М. Земельний капітал: теоретикометодологічні основи формування та функціонування: монографія. Львів: СПОЛОМ, 2011. 520 с.
9. Мамонов К. А., Гой В. В., Ковальчук В. С., Мамонов В. К. Оцінка інвестиційно-інноваційних і безпекових чинників використання земель у системі територіального розвитку регіонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2024. Випуск 116. Частина 1. С. 132–138. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.1/132.pdf
10. Мамонов К. А., Гой В. В., Фролов В. О., Ковальчук В. С. Теоретичні підходи до визначення та оцінки територіального розвитку використання земель регіонів. Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура. 2024. Том 6. Вип. 187. С. 185–189. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6405/6326
11. Мамонов К. А., Ковальчук В. С., Гой В. В., Мамонов В. К. Містобудівні чинники територіального розвитку використання земель регіонів. Науковий вісник будівництва. 2024. Випуск № 111. С. 154–159. URL: https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1804/1769
12. Мамонов К. А., Паламар А. Ю., Вяткін Р. С., Гой В. В. Просторове забезпечення використання нерухомості регіонів для розробки геоінформаційних моніторингових карт. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2024. Випуск 115. Частина 2. С. 199–206. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/199.pdf
13. Mamonov K., Velychko V., Holovachov V., Kovalenko L. Theoretical and methodological provisions regarding the development and implementation of an integral method for assessing the level of information support of the multipurpose real estate cadastre at the regional level. Ukrainian Metrological Journal. 2023. № 2. Pp. 40–51.

14. Bieliatynskyi A., Wen Mingming, Mamonov K., Kondratyuk I., Frolov V. Land Administration in the Territorial Development System of the Regions: Theoretical Issues and Evaluation Methodology. Journal of Urban Planning and Development. 2023. № 149(2). Pp. 1–9. URL: https://www.researchgate.net/publication/368689902_Land_Administration_in_the_Territorial_Development_System_of_the_Regions_Theoretical_Issues_and_Evaluation_Methodology

15. Бистряков І. К., Новоторов О. С., Ніколаєнко Т. С. Деякі інституціональні аспекти земельних відносин в Україні: стан та напрями вдосконалення. Київ, 2002. 134 с.

16. Мельничук Л. С. Проблеми сталого та раціонального землекористування в Україні. Глобальні та національні проблеми економіки. 2014. Випуск 2. С. 910–914.

17. Уланчук В. С., Альошкіна Л. П. Шляхи підвищення ефективності використання земельних ресурсів у сільськогосподарських підприємствах регіону. Економка АПК. 2009. № 9. С. 10–15.

18. Офіційний сайт Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру. URL: https://land.gov.ua

EFFICIENCY OF LAND USE OF THE REGIONS: DIRECTIONS AND PECULIARITY OF SECURITY

Mamonov Kostiantyn A., Doctor of Economic Sciences, Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com, tel. +380992917354, http://orcid.org/0000-0002-0797-2609

Radzinska Yuliia B., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: radzinskayayb@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1661-7975

Shterndok Ernest S., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: shterndok@ukr.net, tel. +380934289234, https://orcid.org/0000-0003-1107-7401

Viatkin Roman S., Candidate of technical sciences, docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: viatkinr@gmail.com, tel. +380950034439, https://orcid.org/0000-0001-8807-9988

Peku Olena A., Student of MZUK-2024-2, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: olena.peku@kname.edu.ua, https://orcid.org/0009-0009-8418-1294

Summary. The technological capabilities of mankind today have led to the fact that electronic maps have become an integral part of the lives of many people, paper maps, which have their own advantages, have not lost their relevance.

The article substantiates the relevance of the chosen topic and achieves the goal of determining the relevance of using paper maps for cartographic support and cartographic research. The following tasks are solved: the common and negative features of paper and electronic maps are analyzed; the main advantages and disadvantages of electronic and paper maps are analyzed; the possibilities of electronic and paper maps for cartographic research and cartographic support are determined; the conditions for using cartographic modeling are determined and its components are noted; the role and relevance of paper maps in modern cartography are determined.

Paper maps are more convenient for a number of tasks. The article establishes that despite the development of technology and the availability of electronic maps, paper maps, due to their reliability, visual clarity and cultural value, continue to be an important tool for solving a number of tasks. It is noted that the disadvantages of paper maps are opposite to the advantages of electronic ones. In the production of paper maps, paint, varnish and other substances hazardous to the human body are used, which are not present in

electronic ones. However, the production of the components of technical means for visualizing electronic maps is also such that it disrupts the ecological balance.

The key role of the cartographic research method for obtaining cartographic information for its further use in cartographic modeling is noted.

The need to resort to cartographic modeling to obtain digital models based on data from cartographic sources, digital and analog cartographic models, and data obtained during cartographic research is noted.

It has been established that due to the lack of cartographic support, including for cartographic modeling, paper maps of different printing periods represent historical, cultural, and informational value as a universal cartographic source. Modern achievements in cartography allow us to improve the cartographic research method, where paper maps play a key role, and therefore contribute to the further development of the scientific component of this direction.

With the advent of modern technologies, the traditions of paper cartography have also improved. New technologies and capabilities of automated cartography have not led to the disappearance of traditional, paper cartography, but have allowed it to be supplemented and improved.

Keywords: electronic maps, paper maps, cartographic research, cartographic modeling, cartographic sources, visualization, detailing.

References

1. Constitution of Ukraine. Document 254k/96-BP. Editorial from 01.01.2020. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254k/96-VR#text [in Ukrainian].

2. Land Code of Ukraine. Document 2768-III. Editorial from 01.01.2025. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#text [in Ukrainian].

3. Land market in Ukraine. Analytical review for the 3rd quarter and September 2024. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/land_review_iiiq_ua.pdf [in Ukrainian].

4. Hruba, D. (2024) Land and real estate: the state of affairs and prospects of 2024. https://yur-gazeta.com/publications/practice/zemelne-agrarne-pravo/zemlya-ta-nereuhomist-stan-sprav-to-Perspektivi-2024-roku.htm [in Ukrainian].

5. Pankiv, Z. (2009) Ecological problems of land use in Ukraine. Bulletin of Lviv University. The geographical series. Iss. 37. P. 101–105. http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/issue/view/100 [in Ukrainian].

6. Lazeba, E. S. (2014) Improving the efficiency of agricultural land use in Ukraine. Effective economy. № 5. URL: http://www.conmyy.nayka.com.ua/?op=1&z=3062 [in Ukrainian].

7. Melnychuk, L. S. (2014) Problems of sustainable and rational land use in Ukraine. Global and national problems of economy. Issue 2. P. 910–914.

8. Tretyak, A. M. (2011) Land Capital: Theoretical Fundamentals of Formation and Functioning: Monograph. Lviv: Spolol, 520 p.

9. Mamonov, K. A., Goi, V. V., Kovalchuk, V. S., Mamonov, V. K. (2024) Valuation of investment-innovative and security factors of land use in the system of territorial development of regions. Automobile roads and road construction. Issue 116. Part 1. P. 132–138. http://publications.ntu.edu.ua/vtodorogoi_i_stroitelstvo/116.1/132.pdf [in Ukrainian].

10. Mamonov, K. A., Goi, V. V., Frolov, V. O., Kovalchuk, V. S. (2024) Theoretical approaches to determining and evaluating territorial development of land use of regions. Municipal economy of cities. Series: Engineering Sciences and Architecture. Volume 6. Iss. 187. P. 185–189. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6405/6326 [in Ukrainian].

11. Mamonov, K. A., Kovalchuk, V. S., Goi, V. V., Mammonov, V. K. (2024) Urban planning factors of territorial development of land use of regions. Scientific Bulletin of Construction. Issue № 111. P. 154–159. https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1804/1769

12. Mamonov, K. A., Palamar, A. Yu., Viatkin, R. S., Goi, V. V. (2024) Spatial provision of use of real estate of regions for the development of geoinformation monitoring maps. Automobile roads and road

construction. Issue 115. Part 2. P. 199–206. http://publications.ntu.edu.ua/vtodorogoi_i_stroitelstvo/115.2/199.pdf [in Ukrainian].

13. Mamonov, K., Velychko, V., Holovachov, V., Kovalenko, L. (2023) Theoretical and methodological provisions regarding the development and implementation of an integral method for assessing the level of information support of the multipurpose real estate cadastre at the regional level. Ukrainian Metrological Journal. № 2. Pp. 40–51.

14. Bieliatynskyi, A., Wen Mingming, Mamonov, K., Kondratyuk, I., Frolov, V. (2023) Land Administration in the Territorial Development System of the Regions: Theoretical Issues and Evaluation Methodology. Journal of Urban Planning and Development. 2023. № 149(2). Pp. 1–9. https://www.researchgate.net/publication/368689902_Land_Administration_in_the_Territorial_Development_System_of_the_Regions_Theoretical_Issues_and_Evaluation_Methodology [in Ukrainian].

15. Bistriakov, I. K., Novotorov, O. S., Nikolaenko, T. S. (2002) Some institutional aspects of land relations in Ukraine: the state and directions of improvement. Kyiv, 134 p.

16. Melnychuk, L. S. (2014) Problems of sustainable and rational land use in Ukraine. Global and national problems of economy. Issue 2. P. 910–914.

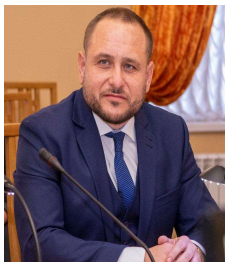
17. Ulanchuk, B. C., Alyoshkin, L. P. (2009) Ways to improve the efficiency of land use in agricultural enterprises of the region. APK's housekeeper. № 9. P. 10-15.

18. Official site of the State Service of Ukraine on Geodesy, Cartography and Cadastre. URL: https://land.gov.ua [in Ukrainian].

УДК 528.4:332.3
UDC 528.4:332.3
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-228-234

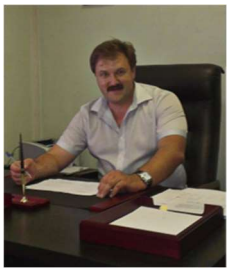
ТЕХНІЧНА ТА БІОЛОГІЧНА РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ПОРУШЕНИХ ЗЕМЕЛЬ ВНАСЛІДОК БУДІВНИЦТВА, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬСЯ ПРИ РОЗРОБЦІ РОБОЧОГО ПРОЕКТУ ЗЕМЛЕУСТРОЮ

TECHNICAL AND BIOLOGICAL RECLAMATION OF BROKEN LAND AS A RESULT OF CONSTRUCTION DETERMINED IN THE DEVELOPMENT OF A WORKING PROJECT OF LAND MANAGEMENT



Мамонов Костянтин Анатолійович, *доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e- mail: kostia.mamonov2017@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0002-0797-2609



Фролов В'ячеслав Олександрович, *кандидат технічних наук, асистент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: frolgis@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-8045-3963



Касьянов Володимир Володимирович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0003-3506-5982

Анотація. Визначено, що формування системи землеустрою потребує удосконалення системи проектування землекористування. При цьому особливого значення має здійснення рекультивації порушених земель внаслідок будівництва.

Технічна рекультивація порушених земель при будівництві здійснюється за наступними напрямами: перед початком будівництва в межах постійного відводу знімається потенційно родючий шар ґрунту товщиною 0,3 м зазначеною в розрахунках та на технологічній схемі зняття родючого та потенційно родючого шарів ґрунту та складається у місці, зазначеному на технологічній схемі; усунення шару ґрунту в місцях його забруднення речовинами, що погіршують родючість; перевірка сумісно з представником землекористувача стану ґрунту з метою виключення можливості засипки забрудненого ґрунту родючим шаром; після проходження будівельного потоку укладений в траншею трубопровід засипають, переміщуючи з відвалу весь мінеральний грунт бульдозерами; бульдозери повертають потенційно родючий шар ґрунту на зону рекультивації. Повернення потенційно родючого шару ґрунту здійснюється екскаватором та бульдозером, проходячи глибше основи відвалу ґрунту,

щоб компенсувати втрати ґрунту в гребеня, залишених обабіч робочого органу. Гребені планують поздовжніми проходами бульдозерів; ущільнення мінеральної землі причіпним катком за три проходи до заповнення трубопроводу транспортованим продуктом; розпланування мінеральної землі, що лишилася після засипки траншеї рівномірним шаром.

Схеми проведення біологічної рекультивації ділянок розробляються робочим проектом землеустрою щодо рекультивації земель, порушених будівництвом розвідувальних свердловин.

У результаті обґрунтування теоретичних положень про напрями та особливості рекультивації порушених земель, визначені функціональні, типологічні, технічні, технологічні її характеристики, що надає можливості для робочого проектування у землеустрою. Досягнута мета дослідження відносно обґрунтування технічної та біологічної рекультивації порушених земель внаслідок будівництва, що визначаються при розробці робочого проекту землеустрою.

У результаті дослідження обґрунтовані напрями та особливості здійснення технічної й біологічної рекультивації порушених земель внаслідок будівництва, що визначаються при розробці робочого проекту землеустрою. Запропоновані моделі для формування кількісної основи біологічної рекультивації порушених земель внаслідок будівництва. Визначено значення технічної й біологічної рекультивації порушених земель у системі проектування для землеустрою, шляхом виконання робочих проектів.

Ключові слова: землеустрій, робочий проект, рекультивація порушених земель, технічна рекультивація, біологічна рекультивація, будівництво.

Вступ. Формування системи землеустрою потребує удосконалення системи проектування землекористування. При цьому особливого значення має здійснення рекультивації порушених земель внаслідок будівництва. Відповідно до Земельного кодексу України рекультивація порушених земель визначається як комплекс організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності порушених земель [1].

Рекультивації підлягають землі, які зазнали змін у структурі рельєфу, екологічному стані ґрунтів і материнських порід та в гідрологічному режимі внаслідок проведення гірничодобувних, геологорозвідувальних, будівельних та інших робіт. Рекультивація земельних ділянок здійснюється шляхом пошарового нанесення на малопродуктивні земельні ділянки або ділянки без ґрунтового покриву знятої ґрунтової маси, а в разі потреби - і материнської породи в порядку, який забезпечує найбільшу продуктивність рекультивованих земель [2].

Для проведення рекультивації порушених земель розробляється робочий проект землеустрою. Поряд з цим, особливого значення має визначення та обґрунтування розділів цього проекту, удосконалення графічного представлення, характеристики охорони праці. Крім того, особливого значення має обґрунтування технічної та біологічної рекультивації порушених земель внаслідок будівництва.

Отже, тема дослідження відносно обґрунтування технічної та біологічної рекультивації порушених земель внаслідок будівництва, що визначаються при розробці робочого проекту землеустрою.

Огляд існуючих теоретичних розробок. На напрямах та значенні рекультивації зосереджена увага у Єтеревської Л. В. [3]. Визначено, що процес рекультивації земель складається з комплексу інженерних, гірничотехнічних, меліоративних, біологічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, що спрямовані на повернення порушених промисловістю територій у різні види природокористування: сільсько- і лісогосподарське, рекреаційне тощо [4].

При проведенні гірничодобувних, геологорозвідувальних, будівельних та інших робіт, пов'язаних з порушенням ґрунтового покриву, відокремлена ґрунтова маса підлягає зняттю, складуванню, збереженню та перенесенню на порушені або малопродуктивні земельні ділянки відповідно до робочих проектів землеустрою. При знятті ґрунтового покриву здійснюється пошарове зняття і роздільне складування верхнього, найбільш родючого шару ґрунту, та інших прошарків ґрунту відповідно до структури ґрунтового профілю, а також материнської породи. Об’єм ґрунтової маси, що

підлягає зняттю і роздільному складуванню, визначається в робочих проектах землеустрою. Роботи із зняття, складування, збереження та нанесення ґрунтової маси на порушені земельні ділянки здійснюються за рахунок фізичних та юридичних осіб, з ініціативи або вини яких порушено ґрунтовий покрив, а роботи з нанесення знятої ґрунтової маси на малопродуктивні землі здійснюються за бажанням власників або землекористувачів, у тому числі орендарів, цих земельних ділянок за їх рахунок [2].

Визначені заходи здійснення рекультивації:

– *технічні*: в технічному сегменті рекультивація порушених земель передбачає розробку і організацію укосів, зняття зруйнованого шару ґрунту і заміна його родючим грантом, осушення або іригація земель, спорудження огорож або висадка природних бар'єрів у вигляді лісосмуг. Загалом — це всі заходи, які покликані нейтралізувати наявний руйнівний ефект і його наслідки;

– *біотехнічні*: розробка планів збагачення ґрунтів корисними мінералами для поліпшення їх продуктивних якостей;

– *організаційні:* спрямовані на первинну підготовку дозвільної документації, вибір підрядників і контроль виконання всіх завдань у ході рекультиваційної діяльності [5].

Функціональні аспекти рекультивації характеризуються напрямами її здійснення:

Підготовчий етап: обстеження та типізація порушених земель і земель, які будуть порушені; вивчення властивостей розкривних порід і їх класифікація з точки зору придатності для біологічної рекультивації; визначення напрямків і методів рекультивації; складання техніко-економічних обґрунтувань і технічних робочих проектів з рекультивації.

Гірничотехнічний етап, також відомий як інженерний або технічний етап рекультивації: селективне зняття, зберігання та збереження придатних для біологічної рекультивації розкривних порід, включаючи родючий шар ґрунту; селективне формування відвалів з розкривних порід; планування та покриття спланованої поверхні шаром родючого ґрунту або потенційно родючих розкривних порід, якщо це необхідно; засипання та планування деформованих поверхностей, таких як провали, карстові воронки та інші; влаштування під'їзних доріг; здійснення меліоративних та протиерозійних заходів.

Біологічний етап передбачає відновлення рослинності та екосистем на порушених землях та включає такі дії: висаджування різноманітних видів рослин, включаючи дерева, кущі та трав'янисті рослини; догляд за рослинами, поливання, внесення добрив та захист від шкідників; стимулювання росту рослин та розвитку біорізноманіття; проведення моніторингу та оцінка ефективності рекультивації [6].

Визначена сільськогосподарська, лісова, водогосподарська, будівельна рекультивація.

У деяких наукових розробках характеризують проблеми для відновлення та рекультивації земель: об'ємне вивертання ґрунту від розривів снарядів; забруднення вибуховими речовинами; забруднення врожаю; хімічне забруднення; вигорання полів; поля під колесами танків; фізичний вплив на ґрунти [7].

Таким чином, у результаті обґрунтування теоретичних положень про напрями та особливості рекультивації порушених земель, визначені функціональні, типологічні, технічні, технологічні її характеристики, що надає можливості для робочого проектування у землеустрою.

Метою дослідження є обґрунтування технічної та біологічної рекультивації порушених земель внаслідок будівництва, що визначаються при розробці робочого проекту землеустрою.

Виклад основного матеріалу. Технічна рекультивація порушених земель при будівництві здійснюється за наступними напрямами:

– перед початком будівництва в межах постійного відводу знімається потенційно родючий шар ґрунту товщиною 0,3 м зазначеною в розрахунках та на технологічній схемі зняття родючого та потенційно родючого шарів ґрунту та складається у місці, зазначеному на технологічній схемі;

– усунення шару ґрунту в місцях його забруднення речовинами, що погіршують родючість;

– перевірка сумісно з представником землекористувача стану ґрунту з метою виключення можливості засипки забрудненого ґрунту родючим шаром;

– після проходження будівельного потоку укладений в траншею трубопровід засипають, переміщуючи з відвалу весь мінеральний грунт бульдозерами;

– бульдозери повертають потенційно родючий шар ґрунту на зону рекультивації. Повернення потенційно родючого шару ґрунту здійснюється екскаватором та бульдозером, проходячи глибше основи відвалу ґрунту, щоб компенсувати втрати ґрунту в гребня, залишених обабіч робочого органу. Гребені планують поздовжніми проходами бульдозерів;

– ущільнення мінеральної землі причіпним катком за три проходи до заповнення трубопроводу транспортованим продуктом;

– розпланування мінеральної землі, що лишилася після засипки траншеї рівномірним шаром.

У теплий період року зняття родючого шару ґрунту та переміщення його у відвал виконувати бульдозерами. При зніманні, складанні і зберіганні родючого шару ґрунту не допускається змішування родючого шару з мінеральними породами, розлив забруднюючих речовин та видування. Враховуючи термін проведення робіт з будівництва розвідувальних свердловин, який не перевищує 1 року, укріплення поверхні відвалів багаторічними травами здійснюється відповідно до ДСТУ.

Зайвий мінеральний грунт, що утворився після будівництва потрібно рівномірно розподілити по зоні рекультивації до нанесення родючого шару або відвезти в місця, погоджені з організаціями, що володіють земельними ділянками.

Нанесення родючого шару ґрунту повинно виконуватися в теплий період року. Для цього використовують бульдозери, що працюють поперечними ходами. При необхідності транспортування його із відвалів, що розташовані на відстані од 0,5 км, використовують скрепери. Для транспортування ґрунту на відстань більше 0,5 км використовують автосамоскиди. Підприємство, що проводить роботи по технічній рекультивації, несе відповідальність за виконання заходів по збереженню та відновленню природних властивостей ґрунтів на відведеній земельній ділянці, передбачених проектом. Земельні ділянки, які до прокладання газопроводу мали сільськогосподарське призначення, після проведення рекультивації цільового призначення не змінять.

Рекультивовані землі, як правило, використовуються під ріллю, кормові угіддя, багаторічні або лісові насадження відповідно до їх використанні до надання під тимчасове будівництво. В залежності від цього біологічною рекультивацією передбачається відповідний комплекс агротехнічних заходів їх освоєння.

Схеми проведення біологічної рекультивації ділянок розробляються робочим проектом землеустрою щодо рекультивації земель, порушених будівництвом розвідувальних свердловин. Керуючись узагальненими показниками зниження вмісту гумусу, рухомих поживних речовин в грунті після використання земельної ділянки під будівництво свердловини, запропоновано прийняти оптимальним термін меліоративного освоєння для її повернення в сільськогосподарські угіддя - 3роки. Перші три роки ділянку необхідно використовувати під багаторічними травами.

Трави, що висіваються, повинні мати здатність швидко створювати зімкнутий травостій і міцну дернину, стійку до змиву і випасу худоби, швидко відростати після скошування. Насіння трав, призначене для посіву, повинно відповідати вимогам стандарту і посівним якостям бути не нижче I репродукції. Трави місцевого походження більш пристосовані до місцевих ґрунтово-кліматичних умов, тому стійкіші до несприятливих умов. Одним з рекомендованих варіантів, при умові переведення ділянки в ріллю, є висів травосуміш: 3м.

Норма висіву насіння оцінюється за моделлю:

$$N = D \, x \, H / F, \qquad (1)$$

де N – норма висіву насіння (кг/га);

D – відсоток складу даного виду (%);

H – розрахункова норма висіву кондиційного насіння у чистому виду (кг/га);
F – господарська придатність насіння (%).

Норми висіву насіння трав на порушених землях збільшені у півтора рази в порівнянні зі звичайними. Для посіву рекомендується наступна травосуміш: люцерна гібридна – 8 кг, еспарцет – 40 кг,стоколосбезостий –12 кг, вівсяниця – 8 кг на 1га.

Система внесення добрив розробляється і здійснюється в тісному взаємозв'язку з усім комплексом агротехнічних прийомів по вирощуванню багаторічних трав. Для правильного використання диференційованого застосування добрив важливе значення має ґрунтово-агрохімічне обстеження з метою визначення реакцій ґрунту і вмісту в ньому рухливих форм поживних речовин, у тому числі мікроелементів.

На кислих дерново-підзолистих ґрунтах, бідних органічною речовиною і елементами живлення, необхідні вапнування і високі норми органічних і мінеральних добрив, особливо азотних. Засолені грунти з високою часткою натрію серед поглинених катіонів необхідно гіпсувати.

Кращий ефект на кислих дернових опідзолених ґрунтах можуть давали фізіологічно лужні азотні добрива і лужні форми фосфорних туків. Тут можуть з успіхом застосовуватися важкорозчинні форми фосфорних добрив. На ґрунтах з нейтральною і лужною реакцією ефективні фізіологічно кислі азотні добрива, а застосування важкорозчинних фосфорних добрив недоцільно. Для кращого забезпечення живлення рослин у початковий період росту поряд з основним внесенням необхідно вносити невеликі дози добрив одночасно з посівом у рядки. Велике значення має внесення в рядки нітроамофоски, тому що в початковий період росту рослини особливо чуттєві од недостатнього вмісту фосфору. Нітроамофоска вноситься звичайними зерновими сівалками в суміші з насінням. Підживлення в період вегетації застосовують на додаток до основного внесення добрив з метою посилення живлення рослин у періоди найбільш інтенсивного споживання ними поживних речовин. У підживлення добрива вносять поверхнево.

Норма мінеральних добрив оцінюється за моделлю:

$$R = W / (B*M), \quad (2)$$

де *R* – кількість мінеральних добрив, необхідна для живлення рослин (ц/га);
W – норма мінеральних добрив рекомендована для даної зони (кг/га);
B – вміст діючої речовини в добривах (%);
M – коефіцієнт для перерахунку (кг/га), прийнятий як 100.

Технологічна схема проведення біологічної рекультивації порушених земель передбачає утримання ґрунту під багаторічними травами на протязі трьох років.

Переведення ділянки в ріллю виконується по схемі: внесення мінеральних добрив; внесення органічних добрив; поверхневий обробіток ґрунту дисковими боронами; оранка; боронування; культивація; посів багаторічних трав; підживлення; коткування посівів.

В процесі проведення підготовчих робіт проведена агрохімічна паспортизація земельної ділянки для проведення біологічної рекультивації на площі 1,24 га. Вартість виконуваних робіт, мінеральних та органічних добрив розрахована аз середніми цінами на ринку України на час складання проекту. При підготовці ґрунту на ділянках проводиться оранка на глибину 30 см, прикочування і передпосівна культивація на глибину 5 см з боронуванням. Під оранку необхідно внести 30 т гною і мінеральних добрив із розрахунку 45Р90К90 на 1га, що складає в стандартних туках: азотних 0,13 т/га, фосфорних 0,48 т/га, калійних 0,30 т/га. Сіяти трави краще навесні або літом при наявності в грунті вологи. Прикочування після посіву обов'язкове.

Починаючи з другого року користування багаторічними травами, необхідно проводити підживлення мінеральними добривами з розрахунку 45Р30К30, на 1 та що складає в стандартних туках: азотних 0,13 т/га, фосфорних 0,16 т/га, калійних 0,10 т/га добрив. Після кожного скошування трав

проводиться підживлення азотом з розрахунку N30, що складає 0,09 т/га в стандартних туках. Після проведення рекультивації порушених земель проводиться обстеження земельної ділянки і складається акт, який підписується представниками інспекційного органу Держкомзему, територіального органу спеціально уповноваженого центрального органу виконавчої влади з питань охорони навколишнього природного середовища та заявником. В акті зазначається відповідність виконаних робіт умовам, визначеним у проекті землеустрою, фіксуються показники агрохімічного паспорта земельної ділянки, з якої було знято родючий шар ґрунту, а також показники агрохімічного паспорта рекультивованої земельної ділянки.

Висновки. У результаті дослідження обґрунтовані напрями та особливості здійснення технічної й біологічної рекультивації порушених земель внаслідок будівництва, що визначаються при розробці робочого проекту землеустрою. Запропоновані моделі для формування кількісної основи біологічної рекультивації порушених земель внаслідок будівництва. Визначено значення технічної й біологічної рекультивації порушених земель у системі проектування для землеустрою, шляхом виконання робочих проектів.

Перелік посилань

1. Земельний кодекс України. Документ 2768-III. Редакція від 07.02.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text
2. Про охорону земель. Закон України. Документ 962-IV. Редакція від 08.11.2024. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text
3. Єтеревська Л. В. Рекультивація земель. Київ: Урожай, 1977. 128 с.
4. Рекультивація земель в добувній промисловості: що це таке і українські реалії. URL: https://neiau.com.ua/rekultivacziya-zemel-v-dobuvnij-promislovosti-shho-cze-take-i-ukraïnski-realiï/
5. Проект рекультивації земель в Україні. URL: https://buro-ocenki.com.ua/news/proekt-rekultivacii-zemel-v-ukraine
6. Етапи і способи рекультивації родовищ. Інститут геології. URL: https://insgeo.com.ua/rekultivacia-rodovysch/
7. Наумчук В. В. Стратегії відновлення та рекультивації земель після воєнних конфліктів. Актуальні проблеми економіки. 2024. № 7. С. 239–248. URL: https://eco-science.net/wp-content/uploads/2024/07/7.24._topic_Viktor-Naumchuk-239-248.pdf

TECHNICAL AND BIOLOGICAL RECLAMATION OF BROKEN LAND AS A RESULT OF CONSTRUCTION DETERMINED IN THE DEVELOPMENT OF A WORKING PROJECT OF LAND MANAGEMENT

Mamonov Kostiantyn A., Doctor of Economic Sciences, Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com, tel. +380992917354, http://orcid.org/0000-0002-0797-2609

Frolov Viacheslav O., Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: frolgis@gmail.com, тел. +380509816112, https://orcid.org/0000-0001-8045-3963

Kasyanov Vladimir V., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3506-5982

Summary. The technological capabilities of mankind today have led to the fact that electronic maps have become an integral part of the lives of many people, paper maps, which have their own advantages, have not lost their relevance.

The article substantiates the relevance of the chosen topic and achieves the goal of determining the relevance of using paper maps for cartographic support and cartographic research. The following tasks are solved: the common and negative features of paper and electronic maps are analyzed; the main advantages and disadvantages of electronic and paper maps are analyzed; the possibilities of electronic and paper maps for cartographic research and cartographic support are determined; the conditions for using cartographic modeling are determined and its components are noted; the role and relevance of paper maps in modern cartography are determined.

Paper maps are more convenient for a number of tasks. The article establishes that despite the development of technology and the availability of electronic maps, paper maps, due to their reliability, visual clarity and cultural value, continue to be an important tool for solving a number of tasks. It is noted that the disadvantages of paper maps are opposite to the advantages of electronic ones. In the production of paper maps, paint, varnish and other substances hazardous to the human body are used, which are not present in electronic ones. However, the production of the components of technical means for visualizing electronic maps is also such that it disrupts the ecological balance.

The key role of the cartographic research method for obtaining cartographic information for its further use in cartographic modeling is noted.

The need to resort to cartographic modeling to obtain digital models based on data from cartographic sources, digital and analog cartographic models, and data obtained during cartographic research is noted.

It has been established that due to the lack of cartographic support, including for cartographic modeling, paper maps of different printing periods represent historical, cultural, and informational value as a universal cartographic source. Modern achievements in cartography allow us to improve the cartographic research method, where paper maps play a key role, and therefore contribute to the further development of the scientific component of this direction.

With the advent of modern technologies, the traditions of paper cartography have also improved. New technologies and capabilities of automated cartography have not led to the disappearance of traditional, paper cartography, but have allowed it to be supplemented and improved.

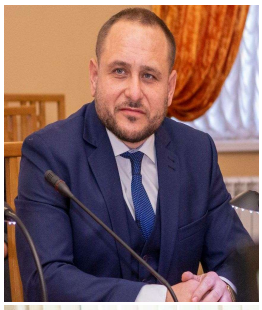
Keywords: electronic maps, paper maps, cartographic research, cartographic modeling, cartographic sources, visualization, detailing.

References

1. Land Code of Ukraine. Law of Ukraine of 07.02.2025 № 2768-III. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text [in Ukrainian].
2. On Land Protection. Law of Ukraine of 08.11.2024 № 962-IV. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text [in Ukrainian].
3. Yeterevskaya, L. V. (1977) Reclamation of land. Kyiv: Harvest, 128 p.
4. Reclamation of land in the mining industry: what is Ukrainian realities. https://neiau.com.ua/rekultivacziya-zemel-v-dobuvnij-promislovosti-shho-cze-take-i-ukraïnski-realiï/ [in Ukrainian].
5. The project of land reclamation in Ukraine. https://buro-ocenki.com.ua/news/proekt-rekultivacii-zemel-v-ukraine [in Ukrainian].
6. Stages and methods of reclamation of deposits. Institute of Geology. https://insgeo.com.ua/rekultivacia-rodovysch/ [in Ukrainian].
7. Naumchuk, V. V. (2024) Strategies of land restoration and reclamation after military conflicts. Actual problems of economy. № 7. 2024. Pp. 239–248. https://eco-science.net/wp-content/uploads/2024/07/7.24._topic_Viktor-Naumchuk-239-248.pdf [in Ukrainian].

УДК 528.4:332.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-235-241**
UDC 528.4:332.3

МІСТОБУДІВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗЕМЛЕВПОРЯДНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
URBAN PLANNING OF LAND MANAGEMENT DESIGN



Мамонов Костянтин Анатолійович, *доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0002-0797-2609



Штерндок Ернест Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: shterndok@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-1107-7401



В'яткін Роман Сергійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: viatkinr@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-8807-9988

Анотація. Нормативно-правового забезпечення щодо організації розподілу та ефективного використання земель для підвищення якості життєдіяльності населення й виробництва. Для визначення практичних аспектів землевпорядкування здійснюється проектування. У системі землевпорядних дій здійснюються оцінні процедури щодо використання земель, де запропоновано визначати містобудівне забезпечення. Для здійснення землевпорядного проектування застосовуються законодавчі акти.

Для формування повної та достовірної інформації у контексті здійснення землевпорядного проектування застосовується містобудівне забезпечення, формуються оцінні процедури його визначення у системі землекористування.

Досягнута мета дослідження відносно визначення параметрів містобудівного забезпечення землевпорядного проектування для територіального розвитку використання земель. На основі сформованого містобудівного забезпечення будується багаторівнева система показників оцінки рівня ефективності використання земель для здійснення землевпорядного проектування.

Сформовано містобудівне забезпечення землевпорядного проектування, які будується на основі систематизації нормативно-правового забезпечення, узагальнення існуючих теоретичних положень та офіційних даних Інтернет-ресурсів. Містобудівне забезпечення надає можливості

розробити кількісне підґрунтя для землевпорядного проектування, розширити коло чинників, що впливають на цей процес.

Ключові слова: землевпорядне проектування, містобудівне забезпечення, сталий розвиток, збалансоване землекористування, територіальний розвиток використання земель.

Вступ. Формування та використання земельних ресурсів є важливим напрямом функціонування регіональних інституцій, діяльності територіальних громад і спрямовано на збалансоване землекористування й сталий розвиток. Крім того, особливого значення має створення й забезпечення територіального розвитку використання земель. Процеси формування й використання земель характеризується як складний процес, що залежить від різних чинників: просторових, екологічних, інвестиційних та ін. У цьому контексті необхідно враховувати містобудівне забезпечення.

Землевпорядкування визначається як система заходів по формуванню та застосуванню нормативно-правового забезпечення щодо організації розподілу та ефективного використання земель для підвищення якості життєдіяльності населення й виробництва. Для визначення практичних аспектів землевпорядкування здійснюється проектування. У системі землевпорядних дій здійснюються оцінні процедури щодо використання земель, де запропоновано визначати містобудівне забезпечення. Для здійснення землевпорядного проектування застосовуються наступні законодавчі акти: Земельний та Господарський Кодекси; Закони України «Про охорону земель», «Про оцінку земель», «Про землеустрій», «Про відчуження земельних ділянок, інших об'єктів нерухомого майна, що на них розміщені, які перебувають у приватній власності, для суспільних потреб чи з мотивів суспільної необхідності», «Про землі енергетики та правовий режим спеціальних зон енергетичних об'єктів», «Про доступ до публічної інформації», «Про місцеве самоврядування в України», «Про державну реєстрацію речових прав на нерухоме майно та їх обтяжень», «Про державну експертизу землевпорядної документації». Для формування містобудівного забезпечення використовуються Закони України: Про регулювання містобудівної діяльності; Про основи містобудування; Про архітектурну діяльність; Про основні засади державного нагляду (контролю) у сфері господарської діяльності; Про відповідальність за правопорушення у сфері містобудівної діяльності; Про будівельні норми; Про енергетичну ефективність; Про благоустрій населених пунктів; Про запобігання впливу світової фінансової кризи на розвиток будівельної галузі та житлового будівництва; Про фінансово-кредитні механізми і управління майном при будівництві житла та операціях з нерухомістю; Про технічні регламенти та оцінку відповідності; Про доступ до об'єктів будівництва, транспорту, електроенергетики з метою розвитку телекомунікаційних мереж; Про оцінку впливу на довкілля; Про енергетичну ефективність будівель; «Про державний ринковий нагляд і контроль нехарчової продукції»; «Про надання будівельної продукції на ринку»; «Про загальну безпечність нехарчової продукції»; «Про технічні регламенти та оцінку відповідності».

Для формування повної та достовірної інформації у контексті здійснення землевпорядного проектування застосовується містобудівне забезпечення, формуються оцінні процедури його визначення у системі землекористування.

Таким чином, тема дослідження є актуальною і спрямована на вирішення важливої задачі до формування й використання містобудівного забезпечення землевпорядного проектування.

Огляд існуючих теоретичних розробок. Проблемні аспекти щодо формування й функціонування системи землевпорядкування представлені у розробках [1–4].

Для забезпечення використання земель як важливого елемента землевпорядкування у контексті територіального розвитку застосовуються відповідні напрями та інструментарій [5–8].

Оцінка чинників використання земель здійснюється із застосуванням інструментів математичного моделювання [6, 9–13].

Технології та фактори здійснення землевпорядного проектування представлені у розробках [14–18].

Поряд з цим, залишаються невирішеними питання щодо формування та використання повного й якісного забезпечення землевпорядного проектування, враховуючи вплив комплексу чинників.

Метою дослідження є визначення параметрів містобудівного забезпечення землевпорядного проектування для територіального розвитку використання земель.

Виклад основного матеріалу. Запропоновані містобудівні чинники, які формуються відповідне забезпечення: зональні; рівні впровадження та реалізації принципів планувально-просторової організації забудови; встановлення червоних ліній та ліній регулювання забудови; встановлення функціонального призначення, визначення режимів та параметрів забудови однієї чи декількох земельних ділянок, розподілу територій згідно з будівельними нормами, державними стандартами і правилами; забезпечення містобудівних умов та обмежень (у разі відсутності плану зонування території) або уточнення містобудівних умов та обмежень згідно із планом зонування території; забезпечення потреб в підприємствах і закладах обслуговування населення; доцільності, обсягів, послідовності реконструкції забудови; забезпечення черговості та обсягів інженерної підготовки території; формування системи інженерних мереж; порядку організації транспортного і пішохідного руху; забезпечення порядку комплексного благоустрою та озеленення, потребу у формуванні екомережі; встановлення межі прибережних захисних смуг і пляжних зон водних об'єктів (у разі відсутності плану зонування території); змін обсягів житлового будівництва; формування характеристик територій (ділянок) для розміщення нового житлового будівництва на вільних територіях, в межах та за межами населеного пункту, а також в районах реконструкції за ємкістю, поверховістю та щільністю забудови з виділенням територій для формування земельних ділянок для будівництва соціального та доступного житла; зведені дані про потреби в територіях під усі види будівництва; інші функціонально-планувальні чинники; питома вага території житлової забудови (садибної, малоповерхової, середньоповерхової, багатоповерхової забудови, багатофункціональної, громадсько-житлової забудови): громадські центри та основні об'єкти загальноміського і районного значення, громадсько-ділова забудова, існуючі будівлі, позначені на картографічній основі, магістральні та житлові вулиці і площі; питома вага озеленених територій загального користування, озеленених територій спеціального призначення (озеленені санітарно-захисні зони, прибережні захисні смуги, розсадники та квітковооранжерейні господарства); питома вага промислових, комунальних та складських територій; питома вага курортних територій; питома вага ландшафтно-рекреаційних територій; інші структурно-планувальні чинники; наявністю сейсмічних зон та зон руйнування земної поверхні, зсувів, затоплення та підтоплення, тектонічних розломів та інших небезпечних природних і антропогенних процесів; наявність зон загазованості, понаднормативного шуму, електромагнітних випромінювань, радіаційного забруднення; наявність площ залягання корисних копалин; санітарно-захисних зон промислових підприємств, цвинтарів та інших комунальних об'єктів; зон обмеження забудови в районах аеропортів з умов безпеки польотів; округів і зон санітарної охорони курортів; зон санітарної охорони джерел водопостачання, водоочисних споруд; захисних зон кар'єрів, відвалів, трубопроводів та інших об'єктів; водоохоронних зон та прибережних захисних смуг водойм і водотоків; територій та охоронних зон природних заповідників, пам'яток природи, архітектури, історії і культури та зони регулювання забудови, ландшафтів, які охороняються; особливо цінних продуктивних земель; наявність зонування промислових та комунальних територій за санітарною класифікацією виробництв; рівні реалізації заходів, які вимагають значного обсягу підсипання або зрізання ґрунтів, дренування, виторфування; реалізації заходів з формування та реконструкції міських гідротехнічних споруд; здійснення заходів щодо ділянок русел річок та інших водоймищ, які підлягають регулюванню, очищенню, днозаглибленню, заключенню у труби; здійснення заходів щодо формування водоохоронних зон та прибережних захисних смуг водоймищ; здійснення заходів з рекультивації порушених територій; здійснення заходів з формування та реконструкції інженерних споруд та джерел; рівень побудови нових та реконструкції існуючих магістральних мереж водо- , тепло-, електро-, газопостачання; побудови та реконструкції зливової каналізації та очисних споруд каналізації; здійснення заходів щодо побудови та реконструкції місць випуску очищених стічних вод; забезпечення високовольтними лініями електропередачі; забезпечення основними об'єктами зв'язку; забезпечення електронними та слабкострумовими пристроями; рівнем інженерного забезпечення; інсторико-культерне забезпечення; будівельні чинники; рівень формування та застосування

просторового забезпечення для містобудування; рівень формування кадастрової інформації у сфері використання земель регіонів для містобудування.

На основі сформованого містобудівного забезпечення будується багаторівнева система показників оцінки рівня ефективності використання земель для здійснення землевпорядного проектування.

Висновки. Таким чином, сформовано містобудівне забезпечення землевпорядного проектування, які будується на основі систематизації нормативно-правового забезпечення, узагальнення існуючих теоретичних положень та офіційних даних Інтернет-ресурсів. Містобудівне забезпечення надає можливості розробити кількісне підґрунтя для землевпорядного проектування, розширити коло чинників, що впливають на цей процес.

Перелік посилань

1. Земельна корупція: ТОП-30 корупційних ризиків та шляхи її подолання. Стратегічний аналіз корупції. Департамент запобігання та виявлення корупції. URL: https://nazk.gov.ua/wp-content/uploads/2021/03/30_anticor_land.pdf

2. Шарий Г. І., Нестеренко С. В., Москаленко Л. В. Подолання економічного підпілля земельних відносин в Україні. Агросвіт. 2021. № 9-10. С. 24–30. DOI: 10.32702/2306-6792.2021.9-10.24

3. Третяк А. М., Третяк В. М., Третяк М. А. Аналіз стану методологічної основи судової землевпорядної експертизи в Україні. Ефективна економіка. 2024. № 8. URL: http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.8.17

4. Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Гунько Л. А., Третяк Н. А. Землевпорядкування в Україні: розвиток на засадах новітньої інституціонально-поведінкової теорії: монографія. Біла Церква: «ТОВ "Білоцерківдрук», 2023. 224 с.

5. Мамонов К. А., Гой В. В., Ковальчук В. С., Мамонов В. К. Оцінка інвестиційно-інноваційних і безпекових чинників використання земель у системі територіального розвитку регіонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2024. Випуск 116. Частина 1. С. 132–138. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.1/132.pdf

6. Мамонов К. А., Гой В. В., Фролов В. О., Ковальчук В. С. Теоретичні підходи до визначення та оцінки територіального розвитку використання земель регіонів. Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура. 2024. Том 6. Вип. 187. С. 185–189. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6405/6326

7. Мамонов К. А., Ковальчук В. С., Гой В. В., Мамонов В. К. Містобудівні чинники територіального розвитку використання земель регіонів. Науковий вісник будівництва. 2024. Випуск № 111. С. 154–159. URL: https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1804/1769

8. Мамонов К. А., Паламар А. Ю., Вяткін Р. С., Гой В. В. Просторове забезпечення використання нерухомості регіонів для розробки геоінформаційних моніторингових карт. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2024. Випуск 115. Частина 2. С. 199–206. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/199.pdf

9. Мамонов К. А., Метешкін К. О., Гой В. В., В'яткін Р. С. Математичне моделювання чинників, що впливають на функціонування складних систем територіального розвитку використання земель регіонів. Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура. 2024. Том 6. Вип. 187. С. 180–184. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6404/632

10. Мамонов К. А., В'яткін Р. С., Штерндок Е. С., Штерндок А. В. Математичне моделювання чинників використання земель об'єктів природно-заповідного фонду регіонів. Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура. 2024. Том 1. Вип. 182. С. 132–136. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-132-136

11. Мамонов К. А., Пілічева М. О., Фролов В. О., В'яткін Р. С., Войтенко О. Р. Математичне моделювання показників геопросторового розвитку територіальних громад. Український журнал

прикладної економіки та техніки. 2024. Том 9. № 3. С. 287–292. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-3-50

12. Mamonov K., Holovachov V., Horb O., Palamar A. Integrated Method for Assessing Information Support of Real Estate Cadastre at Regional Level. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024», Oct 2024, Volume 2024, p. 1–5. URL: https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.2024510086

13. Mamonov K., Velychko V., Holovachov V., Kovalenko L. Theoretical and methodological provisions regarding the development and implementation of an integral method for assessing the level of information support of the multipurpose real estate cadastre at the regional level. Ukrainian Metrological Journal. 2023. № 2. Pp. 40–51.

14. Грещук Г. І. Інформаційне забезпечення землевпорядкування у сільському господарстві. Збалансоване природокористування. 2018. №3. С. 133–140.

15. Лазарева О. Інноваційний характер розвитку сучасного землеустрою. Економічний часопис Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. 2018. № 1. С. 81–87.

16. Семенчук І. М., Юзик В. А. Інформаційне забезпечення управління земельними ресурсами. АгроСвіт. 2018. №4. С. 15–19.

17. Reed M. S., Buenemann M., Atlhopheng J. Cross-scale monitoring and assessment of land degradation and sustainable land management: a methodological framework for knowledge management. Land Degrad. Develop. 2011. № 22. P. 261–271.

18. Williamson I., Enemark S., Wallace J. Sustainability and Land Administration Systems. Melbourne: Department of Geomatics, 2006. 271 p.

URBAN PLANNING OF LAND MANAGEMENT DESIGN

Mamonov Kostiantyn A., Doctor of Economic Sciences, Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com, tel. +380992917354, http://orcid.org/0000-0002-0797-2609

Shterndok Ernest S., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: shterndok@ukr.net, tel. +380934289234, https://orcid.org/0000-0003-1107-7401

Viatkin Roman S., Candidate of technical sciences, docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: viatkinr@gmail.com, tel. +380950034439, https://orcid.org/0000-0001-8807-9988

Summary. Regulatory support for the organization of distribution and efficient use of land to improve the quality of life of the population and production. To determine the practical aspects of land management, design is carried out. In the land management system, evaluative procedures for the use of land are carried out, which is proposed to determine urban planning. Legislative acts are used to carry out land management.

Urban development is used to form complete and reliable information in the context of land management, and evaluative procedures for determining it in the land use system are formed.

The purpose of the study has been achieved regarding the definition of parameters of urban planning for land management design for territorial development of land use. On the basis of the formed town planning support, a multi -level system of indicators of evaluation of the level of efficiency of land use for land management design is built.

Urban planning of land management design, which is based on the systematization of regulatory support, generalization of existing theoretical provisions and official data of Internet resources. Urban planning provides an opportunity to develop a quantitative basis for land management design, to expand the range of factors that influence this process.

Keywords: land management design, urban planning, sustainable development, balanced land use, territorial development of land use.

References

1. Land corruption: TOP-30 corruption risks and ways to overcome it. Strategic analysis of corruption. Department of Corruption Prevention and Detection. https://nazk.gov.ua/wp-content/uploads/2021/03/30_anticor_land.pdf [in Ukrainian].
2. Shari, G. I., Nesterenko, S. V., Moskalenko, L. V. (2021) Overcoming the economic underground of land relations in Ukraine. Agrosvit. № 9–10. P. 24–30. 10.32702/2306-6792.2021.9-10.24 [in Ukrainian].
3. Tretyak, A. M., Tretyak, V. M., Tretyak, M. A. (2024) Analysis of the state of methodological basis of judicial land management expertise in Ukraine. Effective economy. № 8. http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.8.17
4. Tretyak, A. M., Tretyak, V. M., Pryadka, T. M., Gunko, L. A., Tretyak, N. A. (20232) Land management in Ukraine: development on the basis of the latest institutional-behavioral theory: monograph. Bila Tserkva: «Bilotserkivdruk» LLC, 224 p.
5. Mamonov, K. A., Goi, V. V., Kovalchuk, V. S., Mamonov, V. K. (2024) Valuation of investment-innovative and security factors of land use in the system of territorial development of regions. Automobile roads and road construction. Issue 116. Part 1. Pp. 132–138. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.1/132.pdf [in Ukrainian].
6. Mamonov, K. A., Goi, V. V., Frolov, V. O., Kovalchuk, V. S. (2024) Theoretical approaches to determining and evaluating territorial development of land use of regions. Municipal economy of cities. Series: Technical sciences and architecture. Volume 6. Iss. 187. P. 185–189. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6405/6326 [in Ukrainian].
7. Mamonov, K. A., Kovalchuk, V. S., Goi, V. V., Mamonov, V. K. (2024) Urban planning factors of territorial development of land use of regions. Scientific Bulletin of Construction. Issue № 111. P. 154–159. https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1804/1769 [in Ukrainian].
8. Mamonov, K. A., Palamar, A. Yu., Viatkin, R. S., Goi V. V. (2024) Spatial provision of use of real estate of regions for the development of geoinformation monitoring maps. Automobile roads and road construction. Issue 115. Part 2. P. 199–206. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/199.pdf [in Ukrainian].
9. Mamonov, K. A., Meteshkin, K. O., Goi, V. V., Viatkin, R. S. (2024) Mathematical modeling of factors that influence the functioning of complex systems of territorial development of land use of regions. Municipal economy of cities. Series: Technical sciences and architecture. Volume 6. Iss. 187. P. 180–184. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6404/632 [in Ukrainian].
10. Mamonov, K. A., Viatkin, R. S., Shterndok, E. S., Shterndok, A. V. (2024) Mathematical modeling of factors of land use of objects of the nature reserve fund of the regions. Municipal economy of cities. Series: Technical sciences and architecture. Volume 1. Iss. 182. P. 132–136. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-132-136 [in Ukrainian].
11. Mamonov, K. A., Pilicheva, M. A., Frolov, V. O., Viatkin, R. S., Voitenko, O. R. (2024) Mathematical modeling of indicators of geospatial development of territorial communities. Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology. Volume 9. № 3. P. 287–292. https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-3-50
12. Mamonov, K., Holovachov, V., Horb, O., Palamar, A. (2024) Integrated Method for Assessing Information Support of Real Estate Cadastre at Regional Level. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024». Volume 2024. p. 1–5. https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.2024510086 [in Ukrainian].
13. Mamonov, K., Velychko, V., Holovachov, V., Kovalenko, L. (2023) Theoretical and methodological provisions regarding the development and implementation of an integral method for assessing

the level of information support of the multipurpose real estate cadastre at the regional level. Ukrainian Metrological Journal. № 2. Pp. 40–51.

14. Greshchuk, G. I. (2018) Information support of land management in agriculture. Balanced nature management. №3. P. 133–140.

15. Lazareva, O. (2018) Innovative nature of the development of modern land management. Economic Journal of Lesya Ukrainka Eastern European National University. № 1. P. 81–87.

16. Semenchuk, I. M., Yuzik, V. A. (2018) Information support of land management. Agrosvit. №4. P. 15–19.

17. Reed, M. S., Buenemann, M., Atlhopheng, J. (2011) Cross-scale monitoring and assessment of land degradation and sustainable land management: a methodological framework for knowledge management. Land Degrad. Develop. № 22. P. 261–271.

18. Williamson, I., Enemark, S., Wallace, J. (2006) Sustainability and Land Administration Systems. Melbourne: Department of Geomatics, 271 p.

УДК 528.4:332.3
UDC 528.4:332.3
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-242-250

МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НЕРУХОМОСТІ ЗАСОБАМИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ: ВИЗНАЧЕННЯ ТА НАПРЯМИ ЗДІЙСНЕННЯ

MODELING REAL ESTATE BY MEANS OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES: DEFINITION AND DIRECTIONS OF IMPLEMENTATION



Нестеренко Сергій Григорович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформацій-них систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: nesterenkosg34@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-5124-9728



Євдокімов Андрій Анатолійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: akim050776@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-7538-8922



Гой Василь Васильович, *кандидат економічних наук, докторант кафедри економіки та маркетингу, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e- mail: vasssgoi@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0003-1822-4478



Вяткін Роман Сергійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: viatkinr@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-8807-9988

Анотація. Визначено, що сучасні трансформаційні процеси, що відбуваються у сфері використання об'єктів нерухомості, характеризуються виникнення певних протирічь щодо формування категоріального апарату до її визначення, зниженням ефективності використання у деяких регіонах, забезпечення моделювання процесами управління нерухомістю із застосуванням геоінформаційних систем і технологій. Крім того, до негативних наслідків призводить руйнування об'єктів нерухомості внаслідок ведення бойових дій. Крім того, потребують переосмислення процеси територіального розвитку, на які суттєво впливають формування та використання нерухомості.

У результаті дослідження досягнута мета дослідження відносно визначення напрямів моделювання об'єктів нерухомості засобами геоінформаційних систем і технологій. Вирішені завдання: визначення поняття нерухомості; характеристика напрямів моделювання об'єктів нерухомості засобами геоінформаційних систем і технологій.

Геоінформаційне моделювання дозволяє сформувати моніторингове середовище як важливу компоненту використання нерухомості на регіональному рівні, враховуючи вплив просторових, містобудівних, інвестиційних і екологічних чинників. Моделювання надає можливості розробити геоінформаційні моніторингові карти щодо використання нерухомості на основі візуалізації змін протягом відповідного періоду. Крім того, при формуванні геоінформаційного забезпечення враховуються прогнозні зміни інтегрального показника рівня використання нерухомості, що створює кількісну основу прийняття рішень для територіального розвитку.

Встановлено, що у значної кількості регіонів відбувається низький або несуттєвий рівень використання нерухомістю, що обумовлено зниженням просторового забезпечення, диспропорціями, які виникають у містобудівній діяльності, скороченням рівня інвестиційної активності та привабливості й екологічної безпеки. Поряд з цим, у деяких регіонах відбувається «адаптація» до сучасних складних умов, де спостерігається посередній або суттєвий рівень використання нерухомості.

Ключові слова: геоінформаційні системи, геоінформаційні технології, нерухомість, моделювання об'єктів нерухомості, геоінформаційні моніторингові карти, нерухомість.

Вступ. Сучасні трансформаційні процеси, що відбуваються у сфері використання об'єктів нерухомості, характеризуються виникнення певних протирічь щодо формування категоріального апарату до її визначення, зниженням ефективності використання у деяких регіонах, забезпечення моделювання процесами управління нерухомістю із застосуванням геоінформаційних систем і технологій. Крім того, до негативних наслідків призводить руйнування об'єктів нерухомості внаслідок ведення бойових дій. Крім того, потребують переосмислення процеси територіального розвитку, на які суттєво впливають формування та використання нерухомості.

Важливим елементом інформаційного забезпечення та моделювання об'єктами нерухомості є геоінформаційні системи і технології, значення яких протягом останніх років зростає. У цьому контексті слід відзначити сформовану систему нормативно-правового забезпечення: Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних», Постанова Кабінету міністрів України «Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних».

Таким чином, тема роботи є важливою і актуальною для формування та зростання ефективності використання нерухомості із визначенням можливостей застосування сучасних геоінформаційних систем і технологій.

Огляд існуючих теоретичних розробок. Характеризуючи існуючи теоретичні положення, нерухомість визначається через призму її застосування у загальнодержавних і регіональних процесах [1–5]. Визначається інструментарій формування та використання нерухомості шляхом застосування відповідних механізмів. У законодавчому забезпеченні поняття нерухомість визначається через призму забезпечення земельних відносин, використання об'єктів земельно-майнових комплексів, обмежень та типологічних особливостей [6–9].

Процес управління нерухомістю визначається через призму правового регулювання за рахунок:

– формування й застосування законодавчого регламентування й контролю за стейкхолдерами на ринку нерухомості;
– оформлення й реєстрація правоустановчих документів щодо використання нерухомості;
– забезпечення управління нерухомістю [10].

Нерухомість визначається з позиції формування та цільового призначення земель та інших об'єктів земельно-майнового комплексу, їх типологічних аспектів [11, 12].

Класифікаційні характеристики нерухомості наступні:

– житлові об'єкти нерухомості;

– нерухомість для комерційної та виробничої діяльності: готелі, офісні приміщення, ресторани, магазини, фабрики, заводи, склади;

– об'єкти нерухомості для сільськогосподарських потреб: ферми, сади;

– суспільні будинки та споруди: лікувально-оздоровчі (лікарні, поліклініки, будинки престарілих, санаторії); навчально-виховні (дитячі садки, ясла, школи, інститути); культосвітні (музеї, парки культури й відпочинку, театри, цирки, планетарії, зоопарки, ботанічні сади);

– спеціальні будинки та споруди – адміністративні (міліція, суд, прокуратура, органи влади), пам'ятники, меморіальні споруди, вокзали, порти тощо;

– інженерні споруди (меліоративні спорудження й дренаж, шахти, тунелі, греблі, естокади) та передавальні пристрої [13].

Відповідно до Податкового кодексу України визначені групи основних засобів та інших необоротних активів:

Класифікація груп основних засобів та інших необоротних активів і мінімально допустимі строки їх амортизації:

– група 1 – земельні ділянки;

– група 2 – капітальні витрати на поліпшення земель, не пов'язані з будівництвом (15 років);

– група 3 – будівлі (20 років), споруди (15 років), передавальні пристрої (10 років);

– група 8 – багаторічні насадження (10 років) [14].

Нерухомість характеризується як земельні та інші природні угіддя, інше майно, що знаходиться на землі і міцно пов'язане з нею (будівлі, споруди, об'єкти) [15].

Нерухомим майном визнається жилий будинок або його частина, квартира, садовий будинок, дача, гараж, інша постійно розташована будівля, а також інший об'єкт, що підпадає під визначення першої групи основних фондів згідно із Законом України «Про оподаткування прибутку підприємств» [9].

Нерухоме майно (нерухомість) характеризується як земельна ділянка без поліпшень або земельна ділянка з поліпшеннями, які з нею нерозривно пов'язані, будівлі, споруди, їх частини, а також інше майно, що згідно із законодавством належить до нерухомого майна [16].

Розділяючи вище представлене положення, нерухоме майно визначається як земельні ділянки, а також об'єкти, розташовані на земельній ділянці, переміщення яких є неможливим без їх знецінення та зміни їх призначення (будівлі, споруди) [17].

У результаті систематизації теоретичних положень, нерухомість характеризується як сукупність земель та інших наземних і підземних нерухомих об'єктів, які пов'язані з нею і належать різним групам зацікавлених осіб, переміщення яких не можливо або обмежено можливо, використання яких призводить економічного, соціального, іншого ефектів.

Метою дослідження є визначення напрямів моделювання об'єктів нерухомості засобами геоінформаційних систем і технологій. До завдань відносяться наступні:

– визначення поняття нерухомості;

– характеристика напрямів моделювання об'єктів нерухомості засобами геоінформаційних систем і технологій.

Виклад основного матеріалу. Для зростання ефективності використання нерухомості запропоновано застосовувати моделювання об'єктів нерухомості засобами геоінформаційних систем і технологій, яке здійснюється за наступними етапами:

1. формування інформаційного забезпечення використання нерухомості;
2. побудова кількісної основи для визначення рівня використання нерухомості;
3. розробка методи оцінки рівня ефективності використання нерухомості на регіональному рівні;
4. характеристика інструментарію геоінформаційних систем і технологій для здійснення моделювання використання об'єктів нерухомості на регіональному рівні;
5. здійснення моделювання об'єктів нерухомості регіонів;
6. розробка геоінфомаційних моніторингових карт.

Інформаційне забезпечення спрямовано на визначення чинників, що впливають на використання нерухомості на основі узагальнення та систематизації теоретичних положень, нормативно-правового забезпечення, даних Інтернет-ресурсів та ін.

Побудова кількісної основи для визначення рівня використання нерухомості здійснюється шляхом розробки багаторівневої системи показників оцінки рівня використання нерухомості регіонів.

Запропоновані етапи розробки та реалізації методу інтегрального методу оцінки рівня використання нерухомості регіонів:

1. Формування інформаційно-аналітичного забезпечення інтегральної оцінки рівня використання нерухомості.
2. Застосування багаторівневої системи чинників інтегральної оцінки.
4. Напрями визначення локальних показників із застосуванням експертних і аналітичних методів.
5. Побудова узагальнюючих моделей оцінки.
6. Визначення узагальнюючих показників.
7. Побудова інтегральної моделі оцінки.
8. Визначення вагових коефіцієнтів.
9. Оцінка інтегрального показника рівня використання нерухомості регіонів (IURE).
10. Інтерпретація отриманих результатів.

Результати оцінки рівня використання нерухомості регіонів представлені у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати оцінки інтегрального показника рівня використання нерухомості регіонів, відн. од.

Table 1 – Results of assessment of the integral indicator of the level of use of real estate of regions, units

Регіони	I_{URE}
Вінницький	0,496
Волинський	0,395
Дніпропетровський	0,519
Донецький	0,086
Житомирський	0,349
Закарпатський	0,429
Запорізький	0,193
Івано-Франківський	0,475
Київський	0,637
Кіровоградський	0,568
Луганський	0,02
Львівський	0,61
Миколаївський	0,336
Одеський	0,472
Полтавський	0,405
Рівненський	0,348
Сумський	0,244
Тернопільський	0,478
Харківський	0,218
Херсонський	0,129
Хмельницький	0,405
Черкаський	0,465
Чернівецький	0,455
Чернігівський	0,329

На основі отриманих кількісних параметрів, здійснено геоінформаційне моделювання чинників використання нерухомості. У результаті побудовані геоінформаційні моніторингові карти (рис. 1–5).

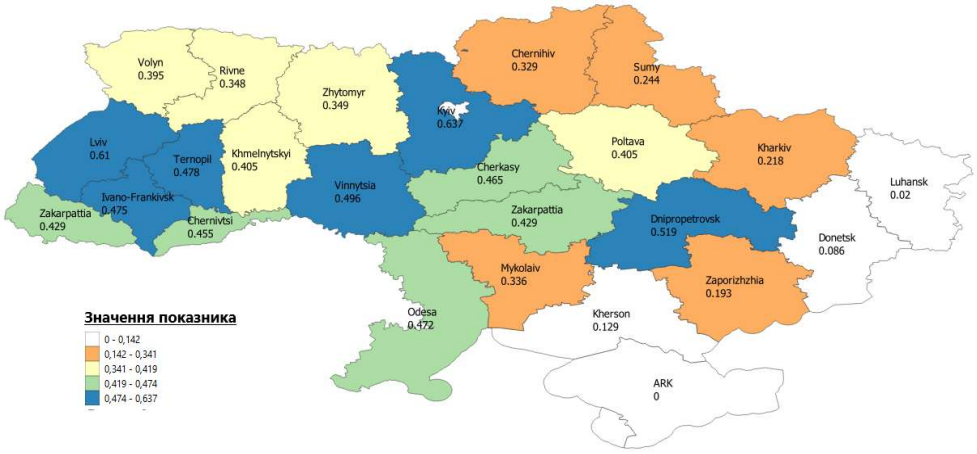


Рисунок 1 – Геоінформаційна моніторингова карта інтегрального показника рівня використання нерухомості регіонів, відн. од.
Figure 1 – Geoinformation monitoring map of integral indicator of the level of use of real estate of regions, units

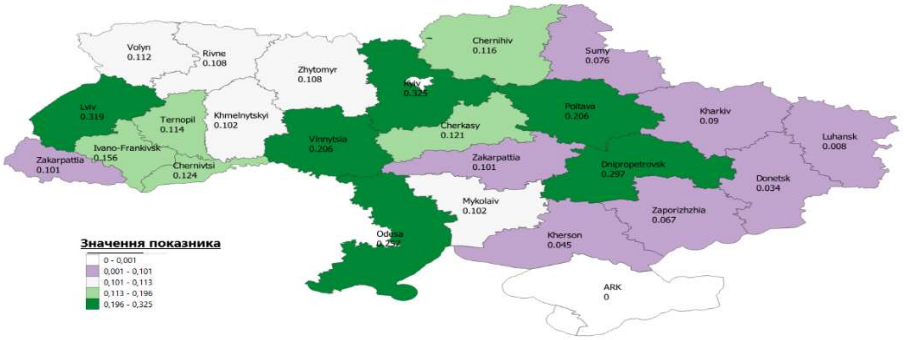


Рисунок 2 – Геоінформаційна моніторингова карта системного просторового чинника, відн. *од.*
Figure 2 – Geoinformation monitoring map of a systemic spatial factor, units

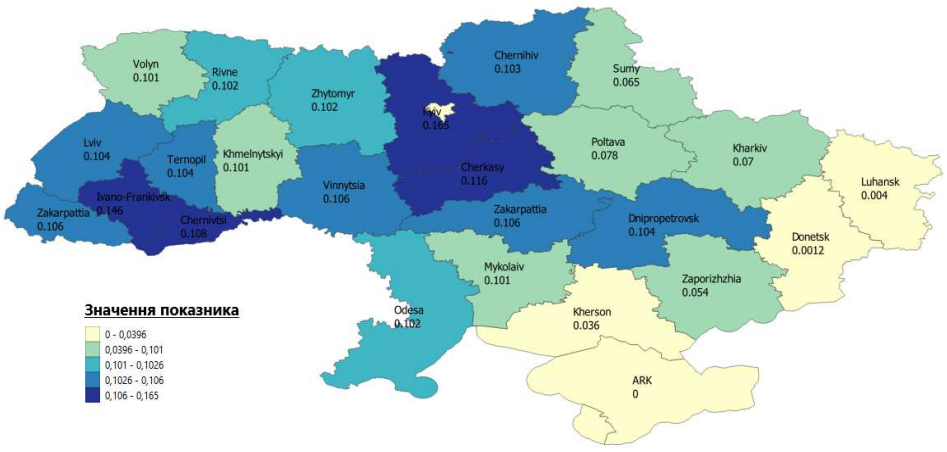


Рисунок 3 – Геоінформаційна моніторингова карта системного містобудівного чинника, відн. *од.*
Figure 3 – *Geoinformation monitoring map of the system planning factor, units*

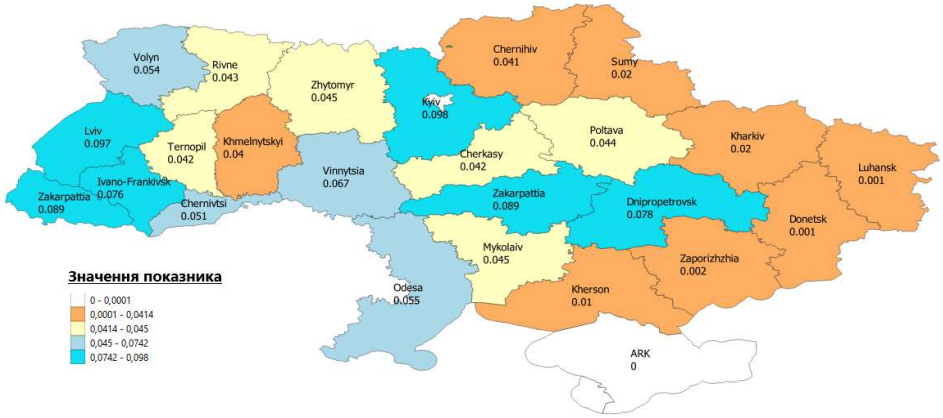


Рисунок 4 – Геоінформаційна моніторингова карта системного інвестиційного чинника, відн. *од.*
Figure 4 – Geoinformation Monitoring Map of System Investment Factor, units

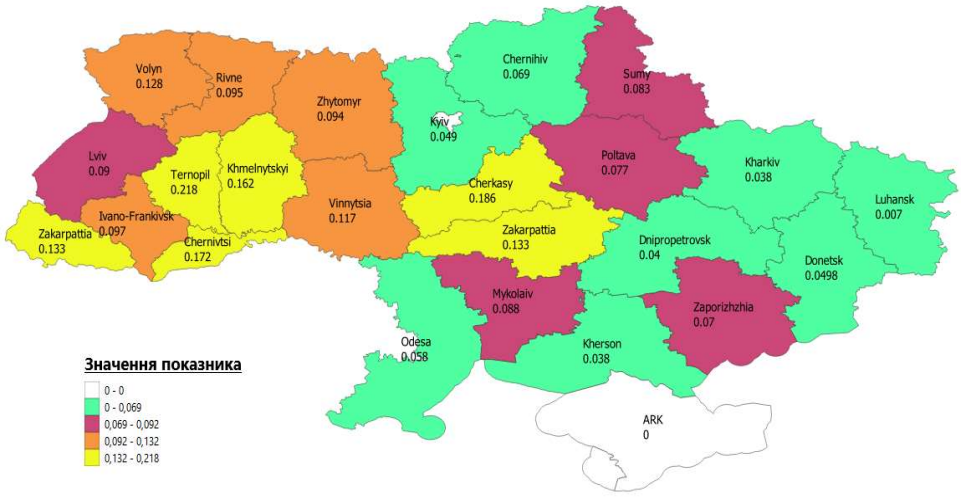


Рисунок 5 – Геоінформаційна моніторингова карта системного екологічного чинника, відн. *од.*
Figure 5 – Geoinformation Monitoring Map of System Ecological Factor, units

Висновки. Геоінформаційне моделювання дозволяє сформувати моніторингове середовище як важливу компоненту використання нерухомості на регіональному рівні, враховуючи вплив просторових, містобудівних, інвестиційних і екологічних чинників. Моделювання надає можливості розробити геоінформаційні моніторингові карти щодо використання нерухомості на основі візуалізації змін протягом відповідного періоду. Крім того, при формуванні геоінформаційного забезпечення враховуються прогнозні зміни інтегрального показника рівня використання нерухомості, що створює кількісну основу прийняття рішень для територіального розвитку.

Встановлено, що у значної кількості регіонів відбувається низький або несуттєвий рівень використання нерухомістю, що обумовлено зниженням просторового забезпечення, диспропорціями, які виникають у містобудівній діяльності, скороченням рівня інвестиційної активності та привабливості й екологічної безпеки. Поряд з цим, у деяких регіонах відбувається «адаптація» до сучасних складних умов, де спостерігається посередній або суттєвий рівень використання нерухомості.

Перелік посилань

1. Грущинська Н. Характеристика нерухомого майна як об'єкта цивільного права. Цивільне право і процес. 2020. №2. С. 23–30. URL: http://pgp-journal.kiev.ua/archive/2020/2/5.pdf

2. Богінська Л. О. Ринок нерухомості: стан та регіональні особливості. Економіка. 2015. Вип. 2(4). Ч. 2. С. 127–133.

3. Олійник Н. І. Розвиток ринку житла в Україні: теорія та практика державного регулювання: монографія. Київ: НАДУ, 2011. 228 с.

4. Павлов К. В. Вплив конкурентних відносин на регіональні ринки нерухомості в умовах інституційного забезпечення. Економічний часопис Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. 2016. № 4(8). С. 89–93.

5. Стрішенець О. М., Павлов К. В. Особливості конкурентних відносин на регіональних ринках нерухомості. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка». 2016. Вип. 1 (47). Т. 2. С. 35–38.

6. Про виконавче впровадження. Закон України. Документ 1404-VIII. Редакція від 01.01.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1404-19#Text

7. Про недержавне пенсійне забезпечення. Закон України. Документ 1057-IV. Редакція від 01.01.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1057-15#Text

8. Про іпотеку. Закон України. Документ 898-IV. Редакція від 15.04.2024. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/898-15#Text

9. Про збір на обов'язкове державне пенсійне страхування. Закон України. Документ 400/97-ВР. Редакція від 08.12.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/400/97-вр#Text

10. Асаул А. М., Павлов В. І., Пилипенко І. І., Павліха Н. В., Кривов'язнюк І. В. Ринок нерухомості. Київ: Кондор, 2006. 336 с.

11. Маркус Я. І. Посібник з оцінки бізнесу в Україні. Київ: Міленіум, 2002. 320 с.

12. Загородній А.Г., Вознюк Г. Л. Фінансово-економічний словник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. 714 с.

13. Кучеренко В. Р., Заєць М. А., Захарченко О. В., Сментина Н. В., Улибіна В. О. Оцінка та управління нерухомістю: навчальний посібник. Одеса: Видавництво ТОВ «Лерадрук», 2013. 272 с.

14. Податковий колекс України від 02.12.2010 № 2755-VI. URL: https://ips.ligazakon.net/document/view/T10_2755

15. Економічна енциклопедія. У трьох томах. Т. 2 / Редкол.: С. В. Мочерний (відп. ред.) та ін. К.: Видавничий центр «Академія», 2001. 848 с.

16. Про затвердження Національного стандарту №1 «Загальні засади оцінки майна і майнових прав». Постанова Кабінету міністрів України від 10.09.2003 р. №1440. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-п#Text

17. Про затвердження класифікатора державного майна. Наказ Фонду державного майна від 15.03.2006 р. №461. URL: https://www.spfu.gov.ua/ua/documents/1407.html

MODELING REAL ESTATE BY MEANS OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES: DEFINITION AND DIRECTIONS OF IMPLEMENTATION

Nesterenko Serhii H., Candidate of technical sciences, Associate professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: nesterenkosg34@gmail.com, tel.+ 380669291752, https://orcid.org/0000-0001-5124-9728

Yevdokimov Andrey A., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: akim050776@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7538-8922

Goi Vasyl V., PhD (Candidate of Economic Science), Doctoral Candidate at the Department of Economics and Marketing, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail: vasssgoi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1822-4478

Vyatkin Roman S., Candidate of technical sciences, docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e- mail: viatkinr@gmail.com, tel. +380950034439, https://orcid.org/0000-0001-8807-9988

Summary. It is determined that modern transformation processes occurring in the field of use of real estate objects are characterized by the emergence of certain contradictions in the formation of a categorical apparatus to its determination, a decrease in the efficiency of use in some regions, to provide modeling processes of real estate management with the use of geoinformation systems and technologies. In addition, the negative effects lead to the destruction of real estate due to combat. In addition, the processes of territorial development, which are significantly influenced by the formation and use of real estate, need rethinking.

As a result of the study, the purpose of the study is to determine the directions of modeling of real estate objects by means of geoinformation systems and technologies. Tasks solved: defining the concept of real estate; Characteristics of the means of modeling of real estate by means of geoinformation systems and technologies.

Geoinformation modeling allows to form a monitoring environment as an important component of the use of real estate at the regional level, taking into account the impact of spatial, urban planning, investment and environmental factors. Modeling provides an opportunity to develop geoinformation monitoring cards for the use of real estate based on visualization of changes over the appropriate period. In addition, the formation of geoinformation support takes into account the forecast changes in the integral indicator of the level of use of real estate, which creates a quantitative basis of decision -making for territorial development.It is established that in a large number of regions, there is a low or insignificant level of use of real estate, which is due to a decrease in spatial support, disproportions that arise in urban planning activity, reducing the level of investment activity and attractiveness and environmental safety. In addition, in some regions there is a «adaptation» to modern difficult conditions, where there is a mediocre or significant level of use of real estate.

Keywords: geoinformation systems, geoinformation technologies, real estate, real estate modeling, geoinformation monitoring maps, real estate.

References

1. Grushchinskaya, N. (2020) Characteristics of real estate as an object of civil law. Civil law and process. № 2. P. 23–30. URL: http://pgp-journal.kiev.ua/archive/2020/2/5.pdf [in Ukrainian].
2. Boginskaya, L. A. (2015) Real Estate Market: Status and Regional Features. Economy. Iss. 2 (4). Part 2. Pp. 127–133.
3. Oliynyk, N. I. (2011) Development of housing market in Ukraine: theory and practice of state regulation: monograph. Kyiv: Nadu, 228 p.
4. Pavlov, K. V. (2016) The influence of competitive relations on regional real estate markets in the conditions of institutional support. Economic Journal of Lesya Ukrainka Eastern European National University. № 4 (8). Pp. 89–93.
5. Strynets, O. M., Pavlov, K. V. (2016) Features of competitive relations in regional real estate markets. Scientific Bulletin of Uzhgorod University. Economics series. Iss. 1 (47). T. 2. Pp. 35–38.
6. About executive implementation. Law of Ukraine. Document 1404-VIII. Editorial from 01.01.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1404-19#text [in Ukrainian].
7. On non-state pension provision. Law of Ukraine. Document 1057-IV. Editorial from 01.01.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1057-15#text [in Ukrainian].
8. About mortgage. Law of Ukraine. Document 898-IV. Editorial from 15.04.2024. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/898-15#text [in Ukrainian].
9. About compulsory state pension insurance. Law of Ukraine. Document 400/97-BP. Editorial from 08.12.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/400/97-VR#text [in Ukrainian].

10. Asaul, A. M., Pavlov, V. I., Pylypenko, I. I., Pavlikha, N. V., Krivovyniuk, I. V. (2006) Real Estate Market. Kyiv: Condor, 336 p.

11. Marcus, Ya.I. (2002) Business Assessment Guide in Ukraine. Kyiv: Millennium, 320 p.

12. Zagorodniy, A. G., Vozniuk, G. L. (2005) Financial and economic dictionary. Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 714 p.

13. Kucherenko, V. R., Zayets, M. A., Zakharchenko, O. V., Zmenina, N. V., Ulyibina, V. O. (2013) Assessment and real estate management: a textbook. Odesa: Publishing House LLC «Lradruk», 272 p.

14. Tax Collex of Ukraine dated December 2, 2010 № 2755-VI. URL: https://ips.ligazakon.net/docment/view/t10_2755 [in Ukrainian].

15. Mocherny, S. V. (2001) Economic encyclopedia: in three volumes. T.2. Kyiv: Academy Publishing Center, 848 p.

16. On Approval of National Standard № 1 «General Principles of Property Valuation and Property Rights». Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of September 10, 2003 №1440. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-P#text [in Ukrainian].

17. On approval of the state property classifier. Order of the State Property Fund of March 15, 2006 №461. URL: https://www.spfu.gov.ua/en/documents/1407.html [in Ukrainian].

УДК 528.4:332.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-251-258**
UDC 528.4:332.3

ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗЕМЛЕВПОРЯДНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

GEOINFORMATION SUPPORT OF LAND MANAGEMENT DESIGN



Нестеренко Сергій Григорович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформацій-них систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: nesterenkosg34@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-5124-9728



Штерндок Ернест Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: shterndok@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-1107-7401



Пишна Анастасія Олександрівна, *студентка 4 курсу, групи ГКЗ 2019-1, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна*

https://orcid.org/0009-0009-9846-4893

Анотація. Актуальність теми дослідження обумовлена тим, що сучасні аспекти розвитку земельних відносин, трансформаційні процеси, забезпечення ефективності використання земельних ресурсів, функціонування міського господарства потребує застосування інноваційних технологій. Для вирішення представлених складних завдань актуальним питанням є визначення напрямів та особливостей застосування геоінформаційних систем для здійснення землевпорядного проектування.

Геопросторове забезпечення землевпорядного проектування визначається як система, що базується на сформованій просторовій, містобудівній, екологічній інформації для реалізації землевпорядкування, організації використання земель та збалансування земельних відносин, розробка якої здійснюється із застосуванням сучасних геоінформаційних систем.

У результаті дослідження досягнута мета відносно визначення напрямів та особливостей застосування геопросторового забезпечення у землевпорядному проектуванні. Вирішені задачі дослідження щодо характеристики геоінформаційних систем для організації земельних відносин та використання земель; визначення напрямів формування геопросторового забезпечення у землевпорядному проектуванні.

Запропоновані напрями геопросторового забезпечення для землевпорядного проектування. Визначено значення та особливості застосування геоінформаційних систем, які є сучасним універсальним інструментарієм формування просторової, містобудівної, екологічної та іншої

інформації. Це створює умови для підвищення якості та повності землевпорядного проектування. Крім того, встановлена необхідність застосування геоінформаційних систем для формування геоінформаційного забезпечення, зокрема в умовах землекористування міст. Застосування ГІС дозволяє сформувати інформацію для землевпорядного проектування у системі забезпечення територіального розвитку використання земель.

Ключові слова: землевпорядне проектування, геоінформаційне забезпечення, геоінформаційні системи, місто, територіальний розвиток використання земель, просторові чинники.

Вступ. Сучасні аспекти розвитку земельних відносин, трансформаційні процеси, забезпечення ефективності використання земельних ресурсів, функціонування міського господарства потребує застосування інноваційних технологій. Для вирішення представлених складних завдань актуальним питанням є визначення напрямів та особливостей застосування геоінформаційних систем (ГІС) для здійснення землевпорядного проектування.

За останні роки відбувається зростання значення геоінформаційних систем у системі земельних відносин і проектуванні шляхом прийняття та використання відповідного нормативно-правового забезпечення. Крім того, сучасні тенденції розвитку землевпорядного проектування визначаються можливостями застосування геоінформаційних систем. Землевпорядне проектування визначається як процес пошуку оптимальних рішень організації використання земель, формування правового режиму землекористування та інформації для прийняття управлінських рішень [1–2].

Землевпорядне проектування як сучасних інструмент організації та забезпечення напрямів використання земель впливає на територіальний розвиток. Зокрема, розвиток використання земель» визначається як система взаємопов’язаних дій, обумовлених соціальними, інституційними, управлінськими особливостями, що призводить до досягнення якісного нового стану земельних відносин порівняно із минулими, враховуючи напрями та рівень взаємодії між різними групами стейкхолдерів, що функціонують у сфері використання земель регіонів [3–4]. Збалансування інтересів зацікавлених осіб у системі земельних відносин, врахування їх інтересів, безпеки і добробуту є основною метою землевпорядного проектування для забезпечення територіального розвитку використання земель.

Організація напрямів та визначення особливостей використання земель впливає на функціонування міського господарства та потребує переосмислення підходів до застосування геоінформаційних систем й формування геопросторового забезпечення землевпорядного проектування.

Таким чином, тема дослідження щодо формування та використання геопросторового забезпечення землевпорядного проектування є актуальною і впливаю на ефективність використання земельних ресурсів, територіального розвитку використання земель та виокремлення можливостей для функціонування міського господарства.

Огляд існуючих теоретичних розробок. Для землевпорядного проектування запропоновано застосовувати геоінформаційні системи. У системі землеустрою охарактеризовані напрями та можливості ГІС для формування й оновлення просторової інформації [5].

Причому особлива увагу фокусується на створенні геопросторового забезпечення шляхом:

- одержання польових геодезичних даних;
- обробки польових журналів;
- створення планово-картографічних матеріалів;
- створення технічної документації;
- проведення економічних розрахунків [5].

Геоінформаційні системи у землеустрої спрямовані на створення та оновлення планово картографічних матеріалів, отримання знань для проведення комплексних досліджень та впроваджень у галузі використання геопросторових даних [6].

Напрями та особливості застосування ГІС представлені у [7–12].

Визначені переваги використання геоінформаційних систем, зокрема, для оцінки земель:

– автоматизація збирання, систематизації та обробки вихідних даних (як картографічних, так і табличних);

– геоінформаційний аналіз бази даних земельних ділянок (просторовий аналіз площ об'єктів, їхньої конфігурації;

– оверлейний та буферний аналіз окремих факторів оцінки; застосування методів інтерполяції й аналізу поверхонь);

– швидкий пошук, сортування та вибірка результатів грошової оцінки окремих земельних ділянок;

– якісна підготовка та виведення на папір результатів грошової оцінки [13].

Відповідно до Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» визначені типологічні параметри геопросторових даних:

– базовими геопросторовими даними є відомості про: систему відліку координат і висот; державний кордон України; адміністративно-територіальні одиниці, в тому числі їх межі; територіальні громади, в тому числі межі їх територій; гідрографічні об'єкти та гідротехнічні споруди; населені пункти, в тому числі їх вулично-дорожню мережу; будівлі та споруди; автомобільні дороги; залізниці; інженерні комунікації; аеропорти, морські та річкові порти; земний покрив та ґрунти; земельні ділянки; реєстри вулиць та адреси об'єктів; географічні назви; цифрову модель рельєфу; ортофотоплани. До тематичних геопросторових даних належать усі види геопросторових даних, що створюються на основі базових геопросторових даних або як самостійні набори даних [14].

Функціональні аспекти використання ГІС представлені у [15–18].

Формування та використання геопросторового забезпечення у системі земельних відносин визначені у роботах [19–21].

Отже, узагальнюючи вищенаведене, геопросторове забезпечення землевпорядного проектування визначається як система, що базується на сформованій просторовій, містобудівній, екологічній інформації для реалізації землевпорядкування, організації використання земель та збалансування земельних відносин, розробка якої здійснюється із застосуванням сучасних геоінформаційних систем.

Метою дослідження є визначення напрямів та особливостей застосування геопросторового забезпечення у землевпорядному проектуванні. Задачі дослідження визначаються як:

– характеристика геоінформаційних систем для організації земельних відносин та використання земель;

– напрями формування геопросторового забезпечення у землевпорядному проектуванні.

Виклад основного матеріалу. Для організації земельних відносин та використання земель застосовуються:

– ArcGIS, який надає широкі можливості для створення, аналізу та візуалізації напрямів землекористування. ArcGIS має багато розширень та інструментів для роботи з геоданими.

– QGIS є відкритим програмним забезпеченням ГІС та має широкий функціонал для формування та аналізу чинників використання земель.

– MapInfo надає потужні інструменти для просторового моделювання чинників землекористування. MapInfo має широкі можливості для обробки геоданих та візуалізації результатів.

Напрямами формування геопросторового забезпечення у землевпорядному проектуванні є:

– збір та обробка інформації щодо організації земельних відносин, використання земель;

– узагальнення інформації та типологізація чинників за просторовими, містобудівними, екологічними та функціональними параметрами;

– формування інформаційної системи чинників для землевпорядного проектування;

– обробка чинників інформаційної системи із застосуванням ГІС;

– формування бази геоданих;

– моделювання чинників із застосуванням геоінформаційних систем;

– формування геопросторового забезпечення для землевпорядного проектування;

– здійснення землевпорядного проектування із застосуванням сформованого геопросторового забезпечення.

У контексті застосування ГІС для обробки та моделювання чинників у системі землевпорядного проектування здійснюється:

– *аналіз та оцінка*: з використанням ГІС можна провести аналіз та оцінку чинників землекористування. У цьому напрями включаються просторові та безпекові чинники, здійснюється їх потенційні можливості у системі землекористування;

– *планування та дизайн*: ГІС дозволяють візуалізувати запропоновану результати оцінки рівня землекористування;

– *реалізація та управління чинниками рівня використання земель*. ГІС можуть також використовуватись для моніторингу земельних відносин.

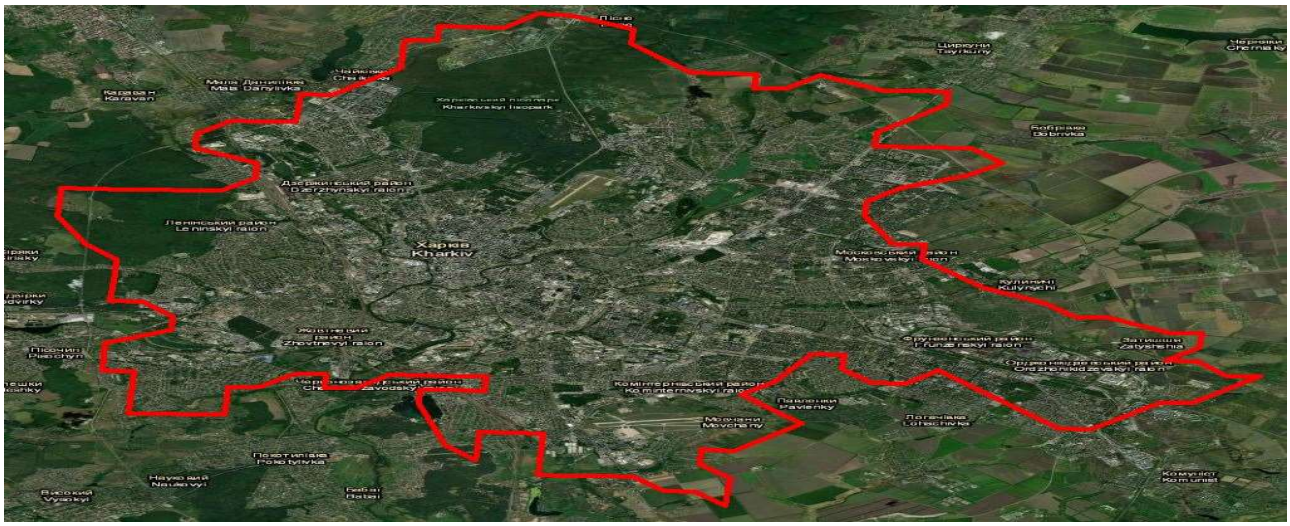


Рисунок 1 – Супутниковий знімок м. Харків
Figure 1 – Satellite picture of Kharkiv

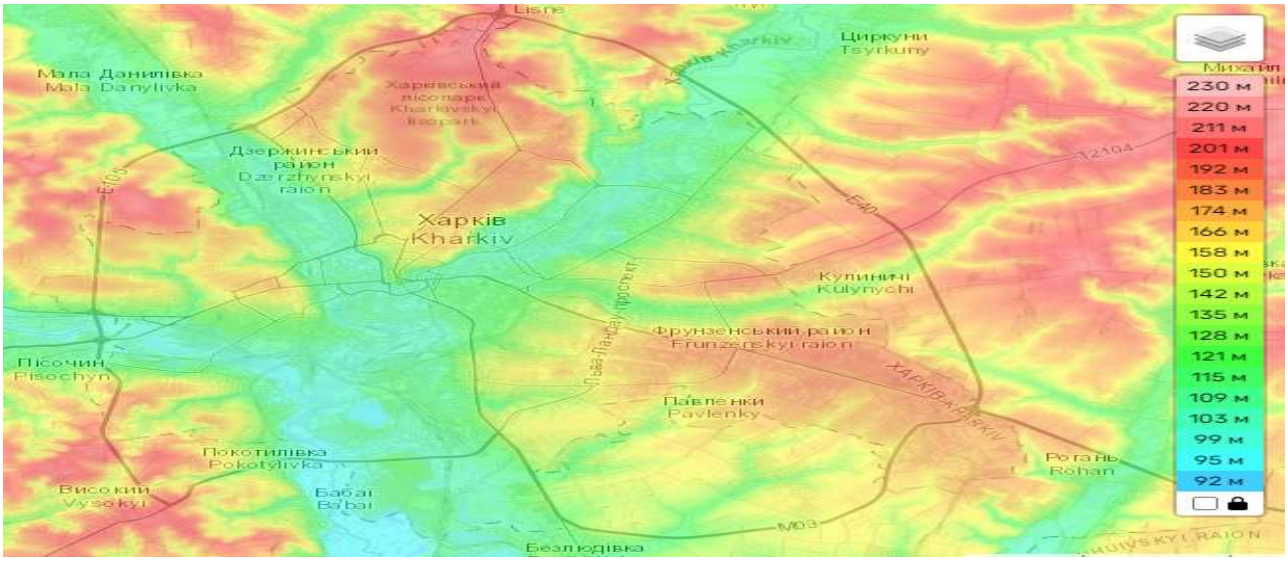


Рисунок 2 – *Цифрова модель рельєфу м. Харків*
Figure 2 – *The digital relief model of Kharkiv*

Геоінформаційні системи забезпечують інструменти для землевпорядного проектування. Вони дозволяють аналізувати дані, візуалізувати розташування і інфраструктуру, оцінювати потенціальне використання земельних ресурсів для територіального розвитку землекористування.

Зокрема, для здійснення землевпорядного проектування застосовується просторова інформація, яка візуалізується наступним чином (рис. 1–3).

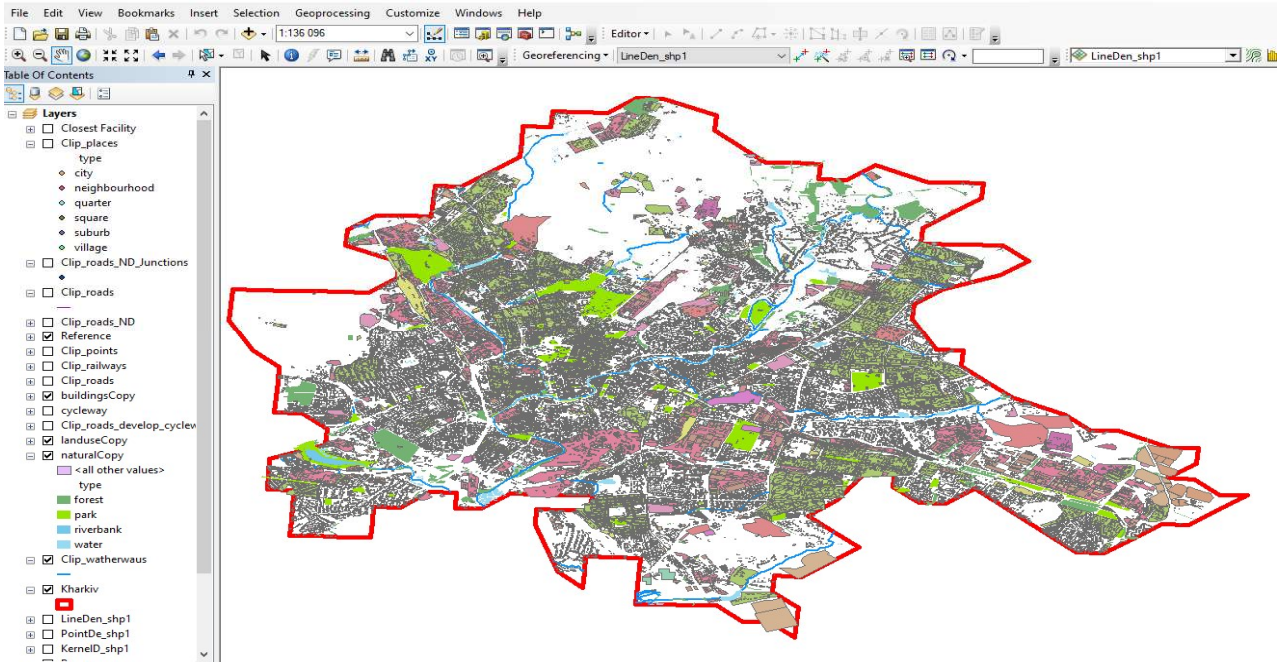


Рисунок 3 – Вікно ArcMap зі створеними векторними шарами
Figure 3 – Arcmap window with vector layers created

Представлена просторова інформація розширюється із врахуванням напрямів та особливостей землевпорядного проектування, просторових, містобудівних, екологічних та інших параметрів.

Висновки. Таким чином, запропоновані напрями геопросторового забезпечення для землевпорядного проектування. Визначено значення та особливості застосування геоінформаційних систем, які є сучасним універсальним інструментарієм формування просторової, містобудівної, екологічної та іншої інформації. Це створює умови для підвищення якості та повності землевпорядного проектування. Крім того, встановлена необхідність застосування геоінформаційних систем для формування геоінформаційного забезпечення, зокрема в умовах землекористування міст. Застосування ГІС дозволяє сформувати інформацію для землевпорядного проектування у системі забезпечення територіального розвитку використання земель.

Перелік посилань

1. Третяк А. М. Теоретичні основи землеустрою Київ : ІЗУ УААН, 2002. 152 с.,
2. Третяк А. М. Землевпорядне проектування: теоретичні основи і територіальний землеустрій : навч. посібник. Київ : ТОВ «ЦЗРУ», 2008. 576 с.
3. Мамонов К. А. Територіальний розвиток використання земель регіону: напрями та особливості оцінки : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 403 с.
4. Mamonov K. Methodological approach to the integral assessment of the regional lands use territorial development. Geodesy and Cartography. 2019. Vol. 45. №. 3. P. 110–115.

5. Толчевська О. Є., Коняєв Ю. Г. ГІС технології в землеустрої. Екологічна безпека та природокористування. 2014. Вип. 14. С. 168–179. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/4b4e849c-5a04-484b-8daf-59e6cc2d83ed/content
6. Геоінформаційні системи в землеустрої. URL: https://wiki.donntu.edu.ua/view/Геоінформаційні_системи_в_землеустрої
7. Костріков С. В., Сегіда К. Ю. Географічні інформаційні системи: навчально-методичний посібник для аудиторної та самостійної роботи студентів за спеціальностями «Географія», «Економічна та соціальна географія». Харків, 2016. 82 с.
8. Зацерковний В. І., Тішаєв І. В., Віршило І. В., Демидов В. К. Геоінформаційні системи в науках про Землю. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2016. 510 с.
9. Шипулін В. Д. Основні принципи геоінформаційних систем: навч. посібник. Харків: ХНАМГ, 2010. 313 с.
10. Rodrigue Jean-Paul. The Geography of Transport Systems. New York: Routledge, 2020. 456 p.
11. Біда П. І. Використання ГІС-технологій у землевпорядному проектуванні. Український журнал прикладної економіки. 2017. Т. 2. № 2. С. 120–128.
12. Доля К. В., Доля О. Є. Геоінформаційні системи на транспорті. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 230 с.
13. Шипулін В. Д., Палеха Ю. М., Штерндок Е. С. ГІС-технології в оцінці землі та нерухомого майна: навч. Посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 183 с.
14. Про національну інфраструктуру геопросторових даних. Закон України. Документ 554-IX. Редакція від 31.12.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text
15. What is GIS? URL: https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview
16. Кохан С. С., Москаленко А. А. Розроблення структури бази знань системи геоінформаційного моніторингу для оцінювання якісного стану земель сільськогосподарського призначення. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. № 5/2 (77). С. 32–37.
17. Kuchuk G., Nechausov S., Kharchenko V. Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store. International Conference on Information and Digital Technologies. 2015. P. 266–271. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982
18. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Сучасний стан та тенденції розвитку комп'ютерних систем об’єктів критичного застосування. Системи управління, навігації та зв’язку. Полтава. ПНТУ, 2018. С. 110–113.
19. Мамонов К. А., Штерндок Е. С., Халіков С. А., Гой В. В., Євдокімов А. А. Формування геопросторового забезпечення для розробки сучасної кадастрової системи нерухомості. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2024. Випуск 116. Частина 2. С. 153–163. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.2/153.pdf
20. Мамонов К. А., Гой В. В., Харів В. В. Міжнародний обмін геопросторовою інформацією та співпраця у сфері земельного кадастр. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2024. Том 9. № 1. С. 216–223. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-1-36.
21. Мамонов К. А., Величко В. А., Поморцева О. Є., Грянік В. О. Стандартизація оцінки площ лісового господарства для формування геопросторового забезпечення моніторингу використання земель. Український метрологічний журнал. 2023. № 1. С. 53–60.

GEOINFORMATION SUPPORT OF LAND MANAGEMENT DESIGN

Nesterenko Serhii H., Candidate of technical sciences, Associate professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: nesterenkosg34@gmail.com, tel.+ 380669291752, https://orcid.org/0000-0001-5124-9728

Shterndok Ernest S., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: shterndok@ukr.net, tel. +380934289234, https://orcid.org/0000-0003-1107-7401

Pyshna Anastasiia O., 4th year student, GCZ 2019-1 Group, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Summary. The relevance of the topic of research is due to the fact that modern aspects of development of land relations, transformation processes, ensuring the efficiency of use of land resources, functioning of the urban economy requires the use of innovative technologies. To solve the complex tasks presented, the urgent issues are to determine the directions and features of the use of geoinformation systems for land management.

Geo -spatial provision of land management design is defined as a system based on the formed spatial, urban planning, ecological information for the implementation of land management, organization of land use and balancing land relations, the development of which is carried out with the use of modern geoinformation systems.

As a result of the study, the purpose was to determine the directions and features of the use of geospatial support in land management design. The tasks of research on the characteristics of geoinformation systems for the organization of land relations and land use have been solved; Determination of directions of formation of geospatial support in land management design.

The directions of geospatial support for land management are proposed. The importance and features of the use of geoinformation systems, which are a modern universal toolkit for the formation of spatial, urban planning, environmental and other information. This creates the conditions for improving the quality and completeness of land management design.In addition, there is a need to use geoinformation systems for the formation of geoinformation support, in particular in the conditions of land use of cities. The use of GIS allows to form information for land management design in the system of ensuring territorial development of land use.

Keywords: land management design, geoinformation support, geoinformation systems, city, territorial development of land use, spatial factors.

References

1. Tretyak, A. M. (2002) Theoretical foundations of land management Kiev: IDU UAAS, 152 p.
2. Tretyak, A. M. (2008) Land Management Design: Theoretical Foundations and Territorial Land Management: Educ. manual. Kyiv: ZSRU LLC, 576 p.
3. Mamonov, K. A. (2020) Territorial development of land use of the region: directions and features of valuation: monograph. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 403 p.
4. Mamonov, K. (2019) Methodological approach to the integral assessment of the regional lands use territorial development. Geodesy and Cartography. Vol. 45. №. 3. Pp. 110–115.
5. Tolchevskaya, O. E., Konyaev, Yu. G. (2014) GIS technology in land management. Environmental safety and nature management. Iss. 14. P. 168–179. https://repositary.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/4b4e849c-5a04-484b-8daf-59e6cc2d83ed/content [in Ukrainian].
6. Geoinformation systems in land management. https://wiki.donntu.edu.ua/view/Геоінформаційні_системи_в_землеустрої [in Ukrainian].
7. Kostrikov, S. V., Sehida, K. Yu. (2016) Geographical information systems: a textbook for auditory and independent work of students in the specialties «Geography», «Economic and social geography». Kharkiv, 82 p.
8. Zerkovnyi, V. I., Tishaev, I. V., Virchilo, I. V., Demidov, V. K. (2016) Geoinformation systems in the sciences of land. Nizhin: NDU them. M. Gogol, 510 p.
9. Shypulin, V. D. (2010) Basic principles of geoinformation systems: textbook. manual. Kharkiv, 313 p.
10. Rodrigue, Jean-Paul (2020) The Geography of Transport Systems. New York: Routledge, 456 p.
11. Bida, P. I. (2017) The use of GIS technologies in land management design. Ukrainian Journal of Applied Economics. Vol. 2. № 2. Pp. 120–128.
12. Dolia, K. V., Dolia, O. Ye. (2018) Geoinformation systems on transport. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 230 p.

13. Shypulin, V. D., Palekha, Yu. M., Shterndok, E. S. (2015) GIS technologies in the valuation of land and real estate: textbook. Manual. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 183 p.
14. About the national infrastructure of geospatial data. Law of Ukraine. Document 554-IX. Editorial board dated 31.12.2023. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text [in Ukrainian].
15. What is GIS? https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview
16. Kokhan, S. S., Moskalenko, A. A. (2015) Development of the structure of knowledge base of the system of geoinformation monitoring for assessing the qualitative state of agricultural land. Eastern European magazine of advanced technologies. № 5/2 (77). Pp. 32–37.
17. Kuchuk, G., Nechausov, S., Kharchenko, V. (2015) Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store. International Conference on Information and Digital Technologies. P. 266–271. http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982 [in Ukrainian].
18. Kovalenko, A. A., Kuchuk, H. A. (2018) The current state and trends of computer systems for critical objects. Management, navigation and communication systems. Poltava. PNTU, Pp. 110–113.
19. Mamonov, K. A., Shterndok, E. S., Khalikov, S. A., Goi, V. V., Yevdokimov, A. A. (2024) Formation of geospatial support for the development of a modern cadastral real estate system. Automobile roads and road construction. Issue 116. Part 2. Pp. 153–163. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.2/153.pdf [in Ukrainian].
20. Mamonov, K. A., Goi, V. V., Khariv, V. V. (2024) International exchange of geospatial information and cooperation in the field of land cadastre. Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology. Volume 9. № 1. Pp. 216–223. https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-1-36. [in Ukrainian].
21. Mamonov K. A., Velychko V. A., Pomortseva O. Ye., Hrianik V. O. (2023) Standardization of estimation of forestry areas for formation of geospatial maintenance of land use monitoring. Ukrainian Metrological Journal. № 1. Pp. 53–60.

УДК 528.4:332.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-259-265**
UDC 528.4:332.3

ФОРМУВАННЯ ГЕОПРОСТОРОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЙ

FORMATION OF GEOSPATIAL SUPPORT FOR MONITORING OF TERRITORIES



Радзінська Юлія Борисівна, *кандидат технічних наук, Доцент кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: radzinskayayb@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-1661-7975



Касьянов Володимир Володимирович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0003-3506-5982



Євдокімов Андрій Анатолійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: akim050776@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-7538-8922



Єлфімов Даніїл Сергійович, *магістр спеціальності 193 Геодезія та землеустрій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: elfimov.daniil@gmail.com*

https://orcid.org/0009-0002-4240-3476

Анотація. Визначено, що сучасні геоінформаційні технології й системи характеризуються як важливий інструментарій, що забезпечує формування напрямів для підвищення ефективності використання земель та забезпечення розвитку територій. За останні роки зростає значення ГІС, адже сформовано та активно застосовується нормативно-правове забезпечення, спостерігаються трансформації на регіональному рівні у сфері землекористування, просторового розвитку, розробці містобудівної документації. Поряд з цим, фокус уваги зосереджується на розробки та використанні моніторингу земель шляхом побудови напрямів формування геопросторового забезпечення.

Моніторинг визначається як система перманентного спостереження та контролю над об'єктами земельно-майнового комплексу, станом та використанням територій, що дозволяє сформувати просторову основу та інформаційне забезпечення для моделювання об'єктів нерухомості із застосуванням геоінформаційних систем і технологій. Для розвитку представленої системи застосовується геодезичний інструментарій та формується геоінформаційний моніторинг.

Досягнута мета дослідження щодо розробки напрямів та інструментів формування геопросторового забезпечення моніторингу територій. До завдань дослідження відносяться: визначення методів розробка геопросторового забезпечення моніторингу територій; охарактеризувати інструментарій формування геопросторового забезпечення моніторингу територій.

У результаті дослідження визначені напрями та інструментарій формування геопросторового забезпечення шляхом застосування сучасних геодезичних й геоінформаційних систем і технологій. Розроблене геопросторове забезпечення спрямовано на розробку та реалізацію геоінформаційного моніторингу для моделювання об'єктів нерухомості у контексті розвитку територій.

Ключові слова: моніторинг, геодезичний моніторинг, моніторинг територій, геопросторове забезпечення, цифрова топографічна модель, моделювання об'єктів нерухомості, геоінформаційні системи, геоінформаційні технології.

Вступ. Сучасні геоінформаційні технології й системи (ГІС) характеризуються як важливий інструментарій, що забезпечує формування напрямів для підвищення ефективності використання земель та забезпечення розвитку територій. За останні роки зростає значення ГІС, оскільки сформовано та активно застосовується нормативно-правове забезпечення, спостерігаються трансформації на регіональному рівні у сфері землекористування, просторового розвитку, розробці містобудівної документації. Поряд з цим, фокус уваги зосереджується на розробки та використанні моніторингу земель шляхом побудови напрямів формування геопросторового забезпечення.

Отримані результати моніторингу територій дозволяють моделювати напрями та особливості використання об'єктів нерухомості. Це сприяє підвищенню ефективності територіального управління на регіональному рівні.

Отже, тема дослідження щодо формування геопросторового забезпечення для моніторингу територій є актуальною і має своєчасний характер.

Огляд існуючих теоретичних розробок. У нормативно-правовому забезпеченні визначається моніторинг земель як система спостереження за станом земель з метою своєчасного виявлення змін, їх оцінки, відвернення та ліквідації наслідків негативних процесів [1].

На напрямах та особливостях здійснення моніторингових процедур фокусується увага у [2–4].

Визначені напрями моніторингу використання земель територіальних громад в умовах військового стану:

– ідентифікація впливу воєнних дій та їх наслідків, зокрема наявність мін, розмежування мінних полів та ін.;
– посилений моніторинг стану об'єктів та місць, що є критично важливими;
– перевірка наявності та стану лісосмуг, гідротехнічних споруд;
– моніторинг самозахоплень, захаращень та інших проявів нераціонального землекористування;
– своєчасна фіксація випадків нецільового використання земель [5].

Особливості реалізації та елементи здійснення моніторингу земель визначені у розробках Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Капінос Н. О., Лобунько Ю. В., Бочко О. І. [6, 7].

Виокремлені напрями моніторингу у сфері територіального розвитку:

– рівень розвитку регіонів, у тому числі базові показники та оновлені дані щодо соціально-економічного й екологічного аспектів, на які впливають публічні політики (на всіх територіальних рівнях), а також міжнародні фактори, інерційні процеси (наприклад, демографічні, кліматичні зміни), колективні рішення приватних суб'єктів (підприємств, громадських організацій,

фізичних осіб). Політика децентралізації та об'єднання громад також мають сприяти розвитку й, таким чином, відносяться до першого напрямку;

– ступінь реалізації Державної стратегії регіонального розвитку;
– реалізація конкретних проектів [8].

Визначається містобудівний моніторинг як система спостережень, аналіз реалізації містобудівної документації, оцінки та прогнозу стану і змін об'єктів містобудування, які проводяться відповідно до вимог містобудівної документації та спрямовані на забезпечення сталого розвитку територій з урахуванням державних і громадських інтересів. Результати містобудівного моніторингу постійно вносяться до містобудівного кадастру та оформляються у вигляді аналітичного звіту, який враховується під час розроблення програм соціально-економічного розвитку та внесення змін до містобудівної документації [9].

На інструментарії здійснення моніторингу земель та територій наголошується у роботах [10 – 12].

Отже, моніторинг визначається як система перманентного спостереження та контролю над об'єктами земельно-майнового комплексу, станом та використанням територій, що дозволяє сформувати просторову основу та інформаційне забезпечення для моделювання об'єктів нерухомості із застосуванням геоінформаційних систем і технологій. Для розвитку представленої системи застосовується геодезичний інструментарій та формується геоінформаційний моніторинг.

Метою дослідження є розробка напрямів та інструментів формування геопросторового забезпечення моніторингу територій. До завдань дослідження відносяться:

– визначити методи розробки геопросторового забезпечення моніторингу територій;
– охарактеризувати інструментарій формування геопросторового забезпечення моніторингу територій.

Виклад основного матеріалу. Геопросторові дані є основою для аналізу, моделювання та прийняття рішень у багатьох галузях, включаючи геодезію, картографію, містобудування, екологію та управління ресурсами. Для забезпечення їх точності, актуальності та відповідності сучасним стандартам використовуються різноманітні технології збору та обробки. Ці технології розвиваються паралельно з інноваціями у сфері інформаційних технологій, супутникових систем, лазерного сканування та програмного забезпечення. Збір геопросторових даних починається з визначення мети й умов роботи. Дані можуть включати інформацію про місцезнаходження об'єктів, їхні геометричні характеристики, атрибути та просторові взаємозв'язки. Технології збору даних розподіляються на кілька основних напрямів: геодезичні методи, супутникове позиціювання, дистанційне зондування Землі, а також наземне та аерофотознімання.

Геодезичні методи, такі як використання тахеометрів, нівелірів і GNSS-приймачів, є класичними підходами до збору даних з високою точністю. Тахеометри дозволяють виконувати вимірювання відстаней і кутів, забезпечуючи точність у кілька міліметрів. Нівеліри використовуються для визначення висотних характеристик місцевості. Сучасні GNSS-приймачі, що працюють з глобальними навігаційними супутниковими системами, забезпечують визначення координат з точністю до сантиметрів у режимі реального часу. Ці методи є незамінними у місцевостях, де необхідно досягти максимальної точності, наприклад, під час розмежування земельних ділянок або проєктування інженерних споруд.

Супутникове позиціювання стало важливим інструментом для збору геопросторових даних завдяки своїй універсальності та глобальному охопленню. Сучасні супутникові технології дозволяють отримувати дані про рельєф, землекористування, стан природних ресурсів і урбанізованих територій.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є ключовою технологією для збору геопросторових даних з великих територій. Це процес отримання інформації про об'єкти без їх безпосереднього контакту шляхом аналізу відбитих або випромінених електромагнітних хвиль. ДЗЗ охоплює аерофотознімання, супутникову зйомку, радіолокацію та лазерне сканування (LiDAR).

Наземні методи, включаючи наземне лазерне сканування (TLS),

дозволяють отримувати геопросторові дані з високою деталізацією. TLS використовується для сканування будівель, мостів, тунелів, промислових об'єктів і культурної спадщини. Ця технологія дає змогу створювати точні 3D-моделі об'єктів, що є важливим для реставрації, реконструкції чи оцінки їхнього технічного стану.

Після збору даних починається процес їх обробки, який включає аналіз, інтеграцію, корекцію та візуалізацію. Сучасні програмні засоби для обробки геопросторових даних використовують геоінформаційні системи, що інтегрують просторові та атрибутивні дані. ГІС дозволяють автоматизувати процеси обробки, аналізувати дані в реальному часі та створювати цифрові моделі місцевості, картографічні матеріали або тематичні карти.

Сучасні методики створення цифрових моделей місцевості (ЦММ) забезпечують широкий спектр можливостей для вирішення різноманітних завдань у науці, техніці та управлінні. Вони поєднують точність традиційних підходів із масштабністю й ефективністю інноваційних технологій, таких як LiDAR і фотограмметрія. Інтеграція цих методик з програмними платформами дозволяє автоматизувати процеси, підвищуючи якість і продуктивність роботи, що робить створення ЦММ одним із найважливіших інструментів у сучасній геоінформаційній сфері.

Після формування інформаційного й просторового забезпечення, даних геодезичного моніторингу, здійснюється обробка інформації із застосуванням спеціалізованих програмних засобів: ArcGIS, QGIS, AutoCAD Civil 3D, Pix4D або Agisoft Metashape.

Для здійснюється моделювання нерухомості формується геопросторове забезпечення із застосуванням геоінформаційних систем і технологій, результатом якого розроблення цифрової топографічної моделі (рис. 1).



Рисунок 1 – Цифрова топографічна модель території
Figure 1 – Digital topographic model of the territory

Висновки. Таким чином, у результаті дослідження визначені напрями та інструментарій формування геопросторового забезпечення шляхом застосування сучасних геодезичних й геоінформаційних систем і технологій. Розроблене геопросторове забезпечення спрямовано на розробку та реалізацію геоінформаційного моніторингу для моделювання об'єктів нерухомості у контексті розвитку територій.

Перелік посилань

1. Земельний кодекс України. Документ 2768-III. Редакція від 01.01.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14/conv#n1781

2. Моніторинг довкілля: Аналітична записка щодо стану та перспектив розвитку державної системи моніторингу довкілля. К.: Міндовкілля. 2023. 119 с.

3. Васенко О. Г., Карлюк А. А., Черба О. В. Система моніторингу довкілля і представлення інформації в доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. ст. XIX Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 14–15 вересня 2023 р.). Харків: УКРНДІЕП. 2023. С. 74–78.

4. Шарапова С. В. Реформування державної системи моніторингу довкілля в Україні. Аналітично-порівняльне правознавство. 2023. № 4(2023). URL: http://journal-app.uzhnu.edu.ua/article/view/287246

5. Бубир Н., Прасул Ю., Куліш С., Бачуріна Д. Моніторинг землекористування територіальних громад України в умовах воєнного стану. Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. 2023. Вип. 37. С. 7–15. URL: https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/23635/21539

6. Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Капінос Н. О., Лобунько Ю. В. Земельний моніторинг в Україні: поняття та методологія формування. Агросвіт. 2022. №1. С. 3–12.

7. Бочко О. І. Моніторинг земель сільськогосподарського призначення. Регіональна економіка та управління. 2019. №2 (24) С. 37–39.

8. Хосе Л. Розробка системи моніторингу територіального розвитку. Децентралізація. URL: https://decentralization.ua/news/13779

9. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України з питань регулювання містобудівної діяльності. Закон України. Документ 5496-VI. Прийняття від 20.11.2012. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5496-17/#Text

10. Мамонов К. А., В'яткін Р. С., Фролов В. О. Моніторинг використання земель регіонів: геоінформаційні аспекти. Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура. 2023. Том 6. Вип. 180. С. 98–102. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-98-102

11. Мамонов К. А., Канівець О. М., Доброходова О. В., Штерндок Е. С. Моніторинг використання земель на регіональному рівні: теоретичні положення та особливості реалізації. Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура. 2023. Том 6. Вип. 180. С. 103–109. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-103-109

12. Мамонов К., Ковальчук В., Горб О. Моніторинг просторових параметрів рекультивованих земель засобами аерофотознімання. Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Будівництво та архітектура. 2023. Вип. 24. С. 133–139. URL: https://visnyk.lnup.edu.ua/index.php/architecture/article/view/211.https://doi.org/10.31734/architecture2023.24.133

FORMATION OF GEOSPATIAL SUPPORT FOR MONITORING OF TERRITORIES

Radzinska Yuliia B., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: radzinskayayb@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1661-7975

Kasyanov Vladimir V., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3506-5982

Yevdokimov Andrey A., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: akim050776@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7538-8922

Yelfimov Daniil S., Master of Specialty 193 «Geodesy and Land Management», O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: elfimov.daniil@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-4240-3476

Summary. It is determined that modern geoinformation technologies and systems are characterized as important tools, which ensures the formation of directions for improving the efficiency of land use and ensuring the development of territories. In recent years, the importance of GIS has increased, regulatory support has been formed and actively applied, transformations at the regional level in the field of land use, spatial development, development of town planning documentation have been observed. In addition, the focus of attention is focused on the development and use of land monitoring by building the directions of formation of geospatial support.

Monitoring is defined as a system of permanent surveillance and control over the objects of the land-property complex, the condition and use of territories, which allows to form a spatial basis and information support for modeling real estate with the use of geoinformation systems and technologies. Geoleasic tools are used for the development of the presented system and geoinformation monitoring is formed.

The purpose of the study to develop the directions and tools of formation of geospatial monitoring of territories is achieved. The tasks of the study include: determination of methods for the development of geospatial monitoring of territories; Describe the tools for the formation of geospatial monitoring of territories.

As a result of the study, the directions and tools of formation of geospatial provision for the use of modern geodetic and geoinformation systems and technologies are identified. The developed geospatial provision is aimed at developing and implementing geoinformation monitoring for modeling real estate in the context of territorial development.

Keywords: monitoring, geodetic monitoring, monitoring of territories, geospatial support, digital topographic model, modeling of real estate, geoinformation systems, geoinformation technologies.

References

1 Land Code of Ukraine. Document 2768-III. Editorial from 01.01.2025. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14/conv#n1781 [in Ukrainian].

2 Environmental Monitoring: Analytical Note on the State and Prospects of the State Environmental Monitoring System. K.: Mindovquil. 2023. 119 p.

3 Vasenko, O. G, Karlyuk, A. A., Cherba, O. V. (2023) System of environmental monitoring and presentation of information in the report on the state of the environment in Ukraine. Environmental Safety: Problems and Ways of Solution: Coll. Sciences. Art. XIX International Scientific and Practical Conference Kharkiv: UkrNDIEP, 74–78.

4 Sharapova, S. V. (2023) Reforming the state environmental monitoring system in Ukraine. Analytical and comparative law. №4 (2023). http://journal-app.uzhnu.edu.ua/article/view/287246 [in Ukrainian].

5 Bubir, N., Prasul, Y., Kulish, S., Bachurina, D. (2023) Monitoring of land use of territorial communities of Ukraine in the conditions of martial law. Problems of continuous geographical education and cartography. № 37. Pp. 7–15. https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/23635/21539 [in Ukrainian].

6 Tretyak, A. M., Tretyak, V. M., Pryadka, T. M., Kapinos, N. O., Lobunko, Yu. V. (2022) Land Monitoring in Ukraine: concept and methodology of formation. Agrosvit. №1. P. 3–12.

7 Bochko, O. I. (2019) Monitoring of agricultural land. Regional economy and management. №2 (24) P. 37–39.

8 Jose, L. (2021) Development of a system of monitoring territorial development. Decentralization. https://decentralization.ua/news/13779 [in Ukrainian].

9 On amendments to some legislative acts of Ukraine on regulation of urban planning activity. Law of Ukraine. Document 5496-VI. Adoption dated November 20, 2012. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5496-17/#text [in Ukrainian].

10 Mamonov, K. A., Viatkin, R. S., Frolov, V. O. (2023) Monitoring the use of land of regions: geoinformation aspects. Municipal economy of cities. Series: Engineering Sciences and Architecture. Volume 6. Iss. 180. P. 98-102. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-98-102 [in Ukrainian].

11 Mamonov, K. A., Kanivets, O. M., Dobrokhodova, O. V., Shterndok, E. S. (2023) Monitoring of land use at the regional level: theoretical provisions and peculiarities of implementation. Municipal economy of cities. Series: Engineering Sciences and Architecture. Volume 6. Iss. 180. P. 103-109. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-103-109 [in Ukrainian].

12 Mamonov, K., Kovalchuk, V., Gorb, O. (2023) Monitoring of spatial parameters of reclaimed land by means of aerial photography. Bulletin of Lviv National University of Environmental Management. Series: Construction and Architecture. Iss. 24. P. 133-139. URL: https://visnyk.lnup.edu.ua/index.php/architecture/article/view/211.https://doi.org/10.31734/architecture2023.24.133 [in Ukrainian].

УДК 528.8:528.48
UDC 528.8:528.48
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-266-278

ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМЕЛЬ У ЗОНАХ БОЙОВИХ ДІЙ: МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ

APPLICATION OF REMOTE SENSING INTERFEROMETRY TO MONITOR LAND DEFORMATIONS IN COMBAT ZONES: METHODOLOGICAL PRINCIPLES AND APPLIED ASPECTS



Сербов Микола Георгійович, *доктор економічних наук, професор, декан факультету гідрометеорології і екології, Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Одеса, Україна, e- mail: serbovng@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0002-0220-6745



Данілова Наталія Василівна, *кандидат географічних наук, старший викладач кафедри агрометеорології та агроекології, Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Одеса, Україна, e- mail: nataliadanilova0212@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0003-2334-6058



Пилип'юк Віктор Вікторович, *кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри гідрології суші, Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Одеса, Україна, e-mail: pilipukvv@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0002-0365-4275

Анотація: Стаття присвячена дослідженню можливостей застосування супутникової інтерферометрії (InSAR) для оцінки деформацій земної поверхні в зонах бойових дій. Збройні конфлікти та бойові дії спричиняють зміни ландшафту та викликають значні деформації земної поверхні. В умовах, де традиційні методи моніторингу є небезпечними або неможливими, дистанційні підходи набувають особливого значення. Ефективним інструментом для виявлення деформації земної поверхні є супутникова інтерферометрія, яка базується на аналізі фазових різниць між двома або більше радарними зображеннями, отриманими з однієї або подібних орбіт у різні моменти часу. Метою даного дослідження є розробка та обґрунтування методологічних підходів до оцінки деформацій земної поверхні в зонах бойових дій з використанням даних супутникової інтерферометрії (InSAR), а також демонстрація її практичного застосування для моніторингу та аналізу наслідків військових дій

для земельних ресурсів. Досліджено негативні та руйнівні наслідки військових операцій для ґрунтової екосистеми. Порушення ґрунтового покриву земельних ділянок умовно поділяють на дві великі групи: первинні та вторинні. Зазначено, що основними типами деформації земельних ділянок у зонах бойових дій є кратерування та вибухові деформації, механічні зсуви, просідання поверхні. Розглянуто інтерферометрію як радіолокаційну технологію із синтезованою апертурою (InSAR), яка використовує пари або більше зображень високої роздільної здатності радіолокаційної технології із синтезованою апертурою (SAR) для створення високоякісних карт рельєфу місцевості за допомогою методів фазової інтерферометрії. Визначено методологічні аспекти оцінки деформації земельних ділянок у зонах бойових дій за допомогою супутникової інтерферометрії. Застосування InSAR вимагає адаптації стандартних методологій та врахування специфічних факторів. Комплексний методологічний підхід оцінки деформацій земної поверхні в зонах бойових дій передбачає етапи та аспекти, які формують методологію обробки та інтерпретацію даних інтерферометричної радіолокації із синтезованою апертурою (InSAR). Він включає в себе чотири етапи: збір та попередня підготовка InSAR-даних; формування інтерферограм; інтерпретація та валідація результатів; аналіз обмежень та рекомендації. Окрему увагу приділено прикладним рішенням з використання супутникової інтерферометрії під час оцінки деформацій земельних ділянок у зонах бойових дій. Супутникова інтерферометрія забезпечує об’єктивну, регулярну та безпечну оцінку стану земної поверхні у зонах бойових дій, шляхом використання фазових зрушень в радіосигналах супутника для визначення зсувів з точністю до міліметрів.

Ключові слова: супутникова інтерферометрія, InSAR, деформації земної поверхні, зони бойових дій, моніторинг, дистанційне зондування, оцінка пошкоджень.

Вступ. Збройні конфлікти та бойові дії спричиняють масштабні руйнування інфраструктури, зміни ландшафту та викликають значні деформації земної поверхні. Деформації є наслідком вибухів, зміщення ґрунтів, утворення вирв, руйнування будівель та гідротехнічних споруд, а також довгострокових ефектів, пов'язаних зі зміною гідрологічного режиму чи тектонічної активності, індукованої військовими діями. У зв’язку з цим постає необхідність у високоточному, систематичному та масштабному моніторингу змін земної поверхні в зонах бойових дій. Традиційні методи моніторингу, такі як наземні геодезичні вимірювання, часто є неможливими або небезпечними у їхньому здійсненні. Ефективним інструментом для цього стає супутникова інтерферометрія (Synthetic Aperture Radar (SAR)).

Супутникова радарна інтерферометрія (Interferometric Synthetic Aperture Radar – InSAR) – це технологія дистанційного зондування Землі, що дозволяє вимірювати дуже малі зміни відстані від супутника до земної поверхні з високою точністю (міліметри-сантиметри) на великих територіях [1-3]. Ця технологія базується на аналізі фазових різниць між двома або більше радарними зображеннями, отриманими з однієї або подібних орбіт у різні моменти часу [2]. Існують різні методи InSAR, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Основою є диференціальна InSAR (DInSAR), яка дозволяє виявити зміни рельєфу та деформації шляхом усунення топографічної складової з інтерферограми [3;4]. Цей метод успішно застосовується для моніторингу територій підземних сховищ газу [3] та зон гірничих виробок [5].

Значний прогрес у моніторингу деформацій досягнуто завдяки багаточасовій радарній інтерферометрії (MT-InSAR), що включає такі підходи, як Persistent Scatterer Interferometry (PSI) та Small Baseline Subset (SBAS) [6;7]. Ці методи дозволяють аналізувати велику кількість SAR-зображень, отриманих протягом тривалого періоду, для виявлення та кількісної оцінки повільних, але постійних деформацій. Вони ефективно долають проблеми тимчасової та просторової декореляції, що є важливим для зон зі складною динамікою. Застосування MT-InSAR знайшло своє відображення у дослідженнях зміщення земної поверхні для території урановидобування в Україні [8]. Українські науковці активно розвивають та адаптують InSAR технології для практичного використання. Так, К. Бурак та інші [1] у дослідженні геодезичного моніторингу деформацій методом радарної інтерферометрії, підкреслили його переваги як оперативність, невисока вартість та мінімальні затрати

часу, швидкий збір картографічної інформації. Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні, зокрема, на території Закарпаття, успішно здійснюється за даними радарної інтерферометрії [2], що свідчить про практичну реалізацію теоретичних розробок. Крім того, дослідження охоплюють моніторинг стану берегової зони території України [9], що демонструє широкий спектр застосування дистанційних методів. Важливим аспектом є також комп'ютерне моделювання у супутниковій геодезії та автоматизація вимірювань, яка значно підвищує ефективність аналізу даних InSAR [10].

Незважаючи на значні досягнення, застосування InSAR у зонах бойових дій, ця технологія має свої особливості та виклики. Пошкодження інфраструктури, руйнування будівель, зміна ландшафту внаслідок вибухів та інтенсивних бойових дій можуть впливати на когерентність SAR-сигналів, ускладнюючи отримання якісних інтерферограм. Однак, саме в таких умовах, де традиційні методи моніторингу є небезпечними або неможливими, дистанційні підходи набувають особливого значення. Моніторинг вертикальних зміщень техногенно навантажених територій методами супутникової інтерферометрії [11] може бути адаптований до умов зон бойових дій, де техногенне навантаження є екстремальним.

Метою даного дослідження є розробка та обґрунтування методологічних підходів до оцінки деформацій земної поверхні в зонах бойових дій з використанням даних супутникової інтерферометрії (InSAR), а також демонстрація її практичного застосування для моніторингу та аналізу наслідків військових дій для земельних ресурсів. Досягнення поставленої мети передбачає виконання наступних завдань: проаналізувати вплив бойових дій на стан земельних ділянок; оцінити потенціал супутникової інтерферометрії (InSAR); розробити методологію обробки та інтерпретації InSAR-даних; розглянути прикладні рішення та можливість їхнього застосування під час військових подій; визначити практичну цінність та перспективи подальших досліджень у цій галузі.

Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів. Одним з найбільш негативних та руйнівних наслідків військових операцій є порушення ґрунтової екосистеми. Порушення грантового покриву земельних ділянок умовно поділяють на дві великі групи: первинні – прямі механічні деформації, теплове забруднення та засмічення поверхні; вторинні – наслідки відсутності повоєнного відновлення, такі як підтоплення, засолення, ерозія, пірогенна деградація та дегуміфікація. Вплив військових дій на ґрунтовий покрив проявляється у механічних, фізичних та хімічних змінах (табл. 1) [12]. До механічних впливів відносяться ущільнення з пошкодженням гумусового шару, небезпечні геоморфологічні процеси (зсуви, осідання), бомбтурбація (утворення кратерів, котлованів, воронок), втрата фізико-хімічних властивостей ґрунту. Фізичний вплив проявляється через вібрацію ґрунтових мас, локальне підвищення температури тощо, а до хімічного – утворення локальних воєнно-техногенних геохімічних аномалій з різним спектром вибухових та інших токсичних речовин.

Зазначимо, що основними типами деформації земельних ділянок у зонах бойових дій – кратерування та вибухові деформації, механічні зсуви, просідання поверхні. Такі пошкодження земної поверхні можуть мати локальний (до 10–50 м²) або регіональний (до десятків км²) характер. Часова динаміка є важливим елементом оцінки деформаційних процесів і включає як миттєві деформації (вибухи), так і довготривалі процеси (зміни внаслідок зсувів чи руйнувань гідроспоруд). Регулярний моніторинг деформацій вимагає спостереження за змінами земної поверхні на певній ділянці протягом певного періоду часу. Спостереження можуть проводитися наземно або космічно. Крім того, ці методи спостереження можуть відрізнятися як для ділянок суші, так і для морських районів. Важливо пам'ятати, що не існує єдиного методу, який би дозволив повне розуміння просідання або підняття, проте поєднання двох або більше методів може дати набагато чіткіше уявлення. До космічних (супутникових) методів моніторингу можна віднести Глобальну систему позиціонування (GPS) та інтерферометрію з радіолокаційною технологією із синтезованою апертурою (InSAR).

На сьогодні GPS-технології забезпечують високу точність геодезичних робіт. Вони стали незамінним інструментом у вивчені руху тектонічних плит, деформацій, спричинених землетрусами, просідання ґрунту, стійкості шахт, дамб та мостів у вимірюванні точних змін положення. Інформацію про місцезнаходження з GPS можна отримати трьома способами: у режимі точного позиціонування, в режимі навігації та в кінематичному режимі. Маючи різний рівень точності, кожен з них підходить для

різних застосувань. Режим точного позиціонування є єдиним, який може забезпечити необхідну точність для безпосереднього вимірювання та моніторингу просідання на рівні 1-10 міліметрів (мм). Відповідно основними сильними сторонами GPS є виявлення рухів у міліметровому масштабі, а до недоліків можна віднести – забезпечення низької щільності точок вимірювання, дороге встановлення та експлуатація безперервної мережі GPS-станцій, надає інформацію лише в окремих місцях, а саме головне потребує значної кількості польових робіт та людських ресурсів, що не припустимо під час бойових дій [13].

Інтерферометрія з радіолокаційною технологією із синтезованою апертурою (InSAR) – це метод, який використовує пари або більше зображень високої роздільної здатності радіолокаційної технології із синтезованою апертурою (SAR) для створення високоякісних карт рельєфу місцевості за допомогою методів фазової інтерферометрії. SAR – це космічна (супутникова) радіолокаційна система високої роздільної здатності, а інтерферометрія – це термін, що використовується для пояснення накладання хвиль з метою виявлення відмінностей під час повторних зборів даних [14]. Це сучасний та недорогий інструмент для дистанційного вимірювання деформації ґрунту. Інструмент використовується для складання характеристики ділянок щодо просідання або підняття ґрунту, які постраждали як від природної, так і від людської діяльності (видобуток нафти або газу, гірничодобувні роботи та видобуток води). Останнім часом використовується під час бойових дій. Супутники спостереження Землі (EOS), на яких розташовані датчики SAR, обертаються навколо Землі на висотах 500-800 км. Ці датчики SAR здатні регулярно (кожні 5-30 днів) знімати великі площі та працювати вдень або вночі за будь-яких погодних умов [15]. Для створення зображення SAR з рухомої антени передаються послідовні імпульси радіохвиль на землю, а відбите відлуння кожного імпульсу приймається та записується між подіями передачі. SAR працює в різних діапазонах електромагнітного спектру залежно від частоти роботи. Найчастіше використовуються діапазони X (8-12 ГГц, довжина хвилі~3 см), C-діапазон (5-6 ГГц, довжина хвилі~6 см) та L-діапазон (1-2 ГГц, довжина хвилі~24 см) [7]. Точні вимірювання деформації ґрунту в міліметровому масштабі проводять протягом різного періоду часу (від днів до років), використовуючи різницю у фазі відбитих радіолокаційних сигналів від двох різних супутників, які проходять над тим самим місцем на поверхні Землі (Рис. 1).

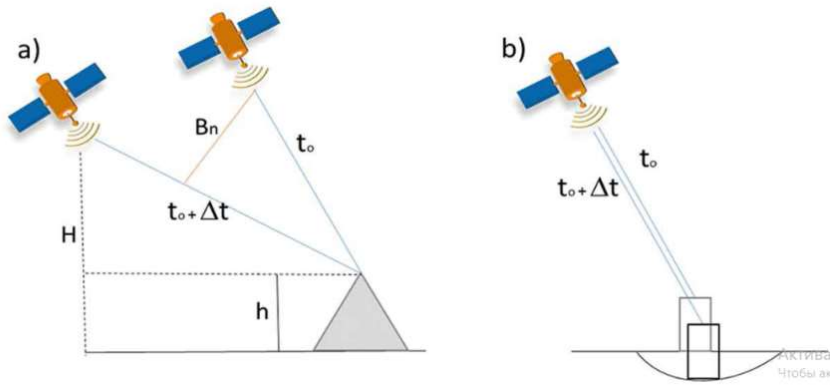


Рисунок 1 – Багатопрохідний SAR-аналіз (t_0 стосується часу першого аналізу, а t_0 +Δt – часу другого аналізу). Геометрична конфігурація аналізу: a) для топографічного виявлення; H – висота орбіти, h – підвищення поверхні; b) для деформації поверхні

Figure 1 – Multi-pass SAR Analysis (t_0 refers to the time of the first analysis, and t_0 + Δt – to the time of the second analysis). Geometric configuration of the analysis: a) for topographic detection; H – orbit height, h – surface elevation; b) for surface deformation

Якщо повторні спостереження за допомогою супутника SAR певної точки на землі дають однакові відстані, то очікується, що фаза відбитого сигналу буде однаковою. Якщо відстань між

повторними спостереженнями змінюється внаслідок рухів супутника або деформації поверхні Землі, то фаза відбитого сигналу також зміниться на величину, що дорівнює зміні довжини хвилі мікрохвильового сигналу, що використовується для вимірювань. Якщо положення супутника на його орбіті відоме точно, то, вимірявши зсув фази мікрохвильового сигналу, відбитого від області на поверхні Землі, можна розрахувати величину просідання або підняття цієї області за заданий період часу. Таким чином, зображення InSAR може бути отримане шляхом вимірювань зміни фази в тисячах пікселів на області на поверхні Землі [7].

На сьогодні найбільше використовують три типи InSAR-аналізу. Перший – Differential InSAR (D-InSAR), який використовується для фіксації змін між двома точками у часі. Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR) – другий тип, що забезпечує довготерміновий аналіз сталих точок на поверхні. Третій тип аналіз дозволяє виявляти поступові деформації при наявності серії супутникових знімків і називається SBAS (Small Baseline Subset).

Застосування InSAR для оцінки деформацій у зонах бойових дій вимагає адаптації стандартних методологій та врахування специфічних факторів, таких як:

- динамічний характер змін ландшафту, що може призводити до декогерентності радарного сигналу, адже руйнування будівель, переміщення техніки та пожежі значно ускладнюють формування стабільних когерентних точок;
- значні деформації спричиняють масштабні, різкі деформації, які перевищують межі чутливості стандартних InSAR методів (наприклад, перевищення 2π фазового циклу);
- відсутність стабільних референсних точок для прив'язки;
- атмосферні явища (вологість, температура та тиск) можуть впливати на затримку радарного сигналу і часто спостерігаються над великими територіями, охопленими військовими діями;
- затінення та спотворення через рельєф території та частково зруйнованої міської забудови, що ускладнює точну інтерферометричну обробку;
- погана відбивна здатність рослинності через рух та коливання листя, гілок та стебл, які змінюють шлях поширення радіолокаційного сигналу, що призводить до втрати фазової інформації між послідовними знімками та зменшує інтенсивність сигналу, повертаючись до супутника, ускладнюючи точне визначення фази.

Для подолання вищезгаданих викликів необхідно застосовувати спеціалізовані InSAR методи та техніки [6;7]:

- багатотимчасовий InSAR (MT-InSAR), який включає методи аналізу – PS-InSAR (Persistent Scatterer Interferometry) та SBAS (Small BAseline Subset), що дозволяють виявляти та моніторити деформації на основі аналізу великої кількості інтерферограм. Це підвищує надійність вимірювань за рахунок усереднення атмосферних ефектів та ідентифікації стабільних (постійних) розсіювачів (Persistent Scatterers – PS) або когерентних пікселів, які зберігають когерентність протягом тривалого часу. У зонах бойових дій пошук таких PS може відбуватись на менш пошкоджених ділянках або на об'єктах, що мають високу відбивну здатність (металеві конструкції);
- швидкий InSAR моніторинг є ефективним для виявлення раптових і значних деформацій (наприклад, після вибухів) і передбачає використання короткої часової бази та аналіз послідовності знімків SAR високої частоти збору даних супутників Sentinel-1, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed;
- комбінування InSAR даних або інтеграція з іншими оптичними зображеннями високої роздільної здатності, як LiDAR, що покращить інтерпретацію отриманих деформаційних полів та розрізнить типи деформацій (наприклад, просідання, зсуви, утворення вирв);
- застосування сучасних алгоритмів (машинного навчання та алгоритмів глибокого навчання) передбачає автоматизацію ідентифікації областей деформацій, їхню класифікацію за типом та фільтрацію шуму, спричиненого бойовими діями;
- моделювання деформацій або розробка геомеханічних моделей сприяє кращому розумінню причин деформацій та прогнозуванню їх подальшого розвитку, враховуючи властивості ґрунтів, підстилаючих порід, а також характер військового впливу.

Таблиця 1 – Алгоритм супутникових радарних даних для виявлення та картографування деформацій у зонах бойових дій

Table 1 – Algorithm of Satellite radar data for detection and mapping of deformations in combat zones

Етап	Кроки	Характеристика
Збір та попередня підготовка InSAR-даних	Вибір території	Ідентифікація конкретних зон бойових дій, де передбачаються значні деформації земної поверхні (лінії зіткнення, райони інтенсивних обстрілів, місця розташування військових об'єктів).
	Часовий інтервал	Визначення періоду для аналізу, що охоплює до, під час та після активних бойових дій, для порівняльної оцінки змін.
	Вибір супутникових даних	Вибір типу супутникових даних (Sentinel-1, ALOS-2 PALSAR-2, TerraSAR-X) залежно від довжини хвилі (C-діапазон, L-діапазон, X-діапазон), просторової роздільної здатності та доступності для досліджуваної області. Враховується часова роздільна здатність (період повторного прольоту супутника) для забезпечення достатньої кількості знімків для часових рядів.
	Завантаження та організація даних	Отримання необроблених даних (Single Look Complex, SLC) з відповідних архівів (наприклад, Copernicus Open Access Hub для Sentinel-1). Створення структурованої системи зберігання даних для ефективного управління великими обсягами інформації.
	Вибір майстер-знімка	Визначення одного знімка як «майстер-знімка» (master image), до якого будуть прив'язані всі інші «слід-знімки» (slave images). Вибір майстер-знімка зазвичай базується на його високій якості, мінімальному атмосферному шумі та центральному положенні в часовому ряду.
Формування інтерферограм	Кореєстрація знімків	Точне геометричне вирівнювання всіх слід-знімків до майстер-знімка. Виконується кореляція амплітуд знімків і кореєстрація за порогом когерентності
	Генерація інтерферограм	Обчислення фазової різниці між кореєстрованими майстер- та слід-знімками. Ця фазова різниця містить інформацію про рельєф місцевості та деформації. Комбінація інтерференційних ліній являє собою повний цикл 2π. На інтерферограмі деформації відображаються у вигляді кольорових смуг (циклів), де кожен повний цикл відповідає зміщенню поверхні на половину довжини хвилі радіолокаційного сигналу супутника. Густина цих смуг вказує на інтенсивність деформації: чим ближче розташовані кольорові лінії, тим більше було зміщення в цій ділянці. Для коректного створення інтерферограми та виділення деформацій з неї, обов'язковим є використання цифрових моделей рельєфу (ЦМР), таких як SRTM або DEM.
	Видалення топографічної фази	Використання цифрової моделі рельєфу (ЦМР, наприклад, SRTM, ASTER GDEM) для видалення топографічної складової з інтерферограми. Це дозволяє виділити фазу, пов'язану виключно з деформаціями.
	Оцінка та фільтрація когерентності	Розрахунок коефіцієнта когерентності для кожної інтерферограми, що вказує на якість інтерферометричного сигналу. Ефективне розгортання фази в InSAR вимагає попередньої фільтрації інтерферограми від шумів та визначення області обробки. Модуль розгортання усуває фазові розриви, що перевищують 2π, забезпечуючи безперервний вимір деформацій.
Інтерпретація та валідація результатів	Картографування деформацій	Створення карт деформацій, що відображають просторовий розподіл та величину вертикальних та/або горизонтальних зміщень.
	Часові ряди деформацій	Побудова графіків часових рядів деформацій для конкретних точок або регіонів, що дозволяє відстежувати динаміку змін
	Кореляція з подіями бойових дій	Аналіз отриманих деформацій у контексті відомих військових подій (обстріли, вибухи, фортифікаційні роботи, рух важкої техніки), що дозволяє ідентифікувати причини деформацій.
	Валідація та верифікація	Порівняння з наземними даними. Візуальна інтерпретація з високороздільними оптичними знімками (до та після подій) для візуального підтвердження руйнувань, вирв, зміщення ґрунту. Порівняння з результатами геомеханічного моделювання впливу вибухів або навантажень на ґрунт.
Аналіз обмежень та рекомендації	Вплив рослинності та руйнувань	Оцінка ступеня деградації когерентності через зміни рослинного покриву або масштабні руйнування інфраструктури. Для подолання цього обмеження – використання супутників з довшими хвилями (L-діапазон)
	Складність розділення джерел деформацій	Розрізнення деформацій, спричинених бойовими діями, від природних процесів (зсуви, осідання, тектонічні рухи).
	Доступність ЦМР	Необхідність використання точної ЦМР, що може бути проблемою в регіонах з частими змінами рельєфу через військові дії.
	Атмосферні ефекти	Попри корекцію, залишкові атмосферні артефакти можуть впливати на точність
	Пост-конфліктний моніторинг	Застосування InSAR для моніторингу відновлювальних процесів, виявлення нових деформацій, пов'язаних з розмінуванням, будівництвом або осіданням ґрунту після руйнувань.

Відповідно, оцінка деформацій земної поверхні в зонах бойових дій за допомогою InSAR вимагає специфічного методологічного підходу, що враховує специфічні умови та особливості таких територій. Комплексний методологічний підхід передбачає етапи та аспекти, які формують методологію обробки

та інтерпретацію даних інтерферометричної радіолокації із синтезованою апертурою (InSAR). Методологія описує послідовність кроків (етапів), необхідних для перетворення необроблених супутникових даних у карти деформацій, а також підходи до їхнього подальшого аналізу та інтерпретації. Вона включає в себе чотири етапи – від попередньої підготовки даних до генерації карт деформацій та їх валідації (табл. 1).

Супутникова інтерферометрія з синтезованою апертурою (InSAR) є сучасним дистанційним методом моніторингу деформацій земної поверхні. У контексті зон бойових дій, де традиційні наземні методи є небезпечними або неможливими, InSAR може вирішити ряд прикладних завдань.

На сьогодні розроблено ефективні підходи моніторингу осідань та підняття ґрунту, які виникають після вибухів, руйнувань будівель, пошкодження інженерних комунікацій (водопроводів, каналізації), зміни рівня ґрунтових вод та інших наслідків бойових дій. Ці негативні процеси створюють ризик для існуючих та майбутніх споруд, доріг, а також можуть впливати на дренажні системи. Завдяки InSAR створюють карти вертикальних деформацій з точністю до міліметрів або сантиметрів та виявляють ділянки, де відбувається осідання або підняття. Порівнюючи інтерферограми, отримані до та після подій, можна кількісно оцінити амплітуду та швидкість цих рухів. Технології такі як PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR) або SBAS-InSAR (Small Baseline Subset InSAR) використовуються для аналізу довгострокових деформацій та виявлення окремих стабільних точок (рис. 2).

Загальна карта деформацій земної поверхні території (рис. 2) розділяє об’єкт дослідження на зони. Зона 1 характеризується максимальними підняттями – 3–4 см за 2 роки. Ця зона розташована на півночі досліджуваної території в межах Свалявського району. Вона займає близько 10 % регіону. Зона 2 характеризується значеннями вертикальних зміщень 1–2 см за 2 роки. Вона займає близько 70 % території, включаючи в себе міста Мукачеве, Іршава, Межигір'я, Поляна і Голятин. Зона 3 займає 20 % досліджуваної території та включає в себе ділянки з опусканням території до 0,3–5,5 см за 2 роки [2].

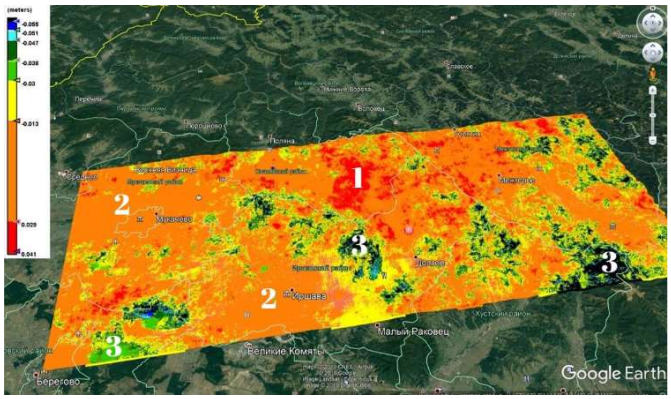


Рисунок 2 – Загальна карта деформацій земної поверхні території Закарпаття
Figure 2 – General Map of Surface Deformations in the Territory of Zakarpattia *Джерело:[2]*

InSAR є ефективним інструментом для моніторингу горизонтальних зміщень ґрунту, що є характерним для зсувів. Адже інтенсивні бойові дії, вибухи та порушення ландшафту (будівництво окопів, вирви, воронки від вибухів снарядів) дестабілізують схили, активізуючи існуючі зсувні процеси. Шляхом аналізу фазових відмінностей між радарними знімками, можна виявити навіть повільні рухи схилів, які невидимі неозброєним оком. Створення часових рядів деформацій дозволяє відстежувати динаміку зсувних процесів. Згідно досліджень [1] були розроблені карти геодинамічних процесів за допомогою супутникової інтерферометрії рудника «Хотінь» Калуш-Голинського родовища. На досліджуваній території зафіксовано три зони: стабільна зона, активна зона осідань зі швидкістю від -6 мм до -20 мм, границі якої чітко співпадають з мульдою зсуву, зумовленою підземними виробітками, та окремі пункти, з осіданнями до 40 мм (рис. 3).

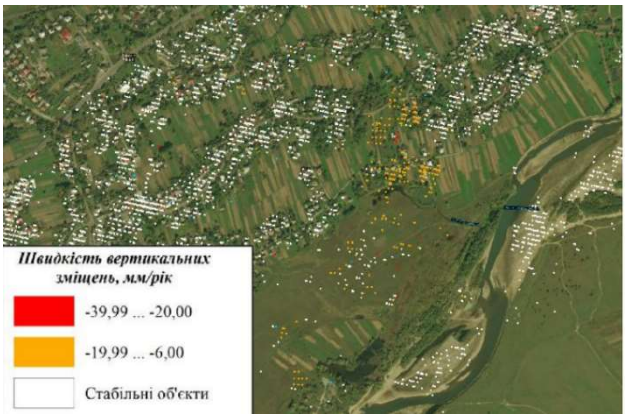


Рисунок 3 – Місця виявлення геодинамічних процесів за допомогою супутникової інтерферометрії
Figure 3 – Locations of geodynamic process detection using satellite interferometry, *Джерело:[1]*

Зазначимо, що воронки від вибухів (кратери) не тільки змінюють топографію, але й суттєво порушують структуру ґрунту навколо себе, створюючи зони декомпресії та дестабілізації. Це може призвести до подальших осідань, утворення провалів або негативного впливу на прилеглі споруди. Відповідно проведення оцінки впливу вибухів та кратерів на стійкість території вирішується завдяки InSAR. Безпосередньо виміряти глибину кратера за допомогою InSAR не можна, але можна виявити та кількісно оцінити деформації ґрунту в навколишній зоні впливу вибуху. Аналіз інтерферограм, отриманих безпосередньо до і після вибуху, може показати зону порушення цілісності ґрунту, що виходить за межі видимого кратера. Так, наприклад дані Sentinel-1 підтверджують деформацію прифронтових ділянок сільськогосподарського призначення Ізюмського району Харківської області після артилерійських обстрілів (рис. 4).

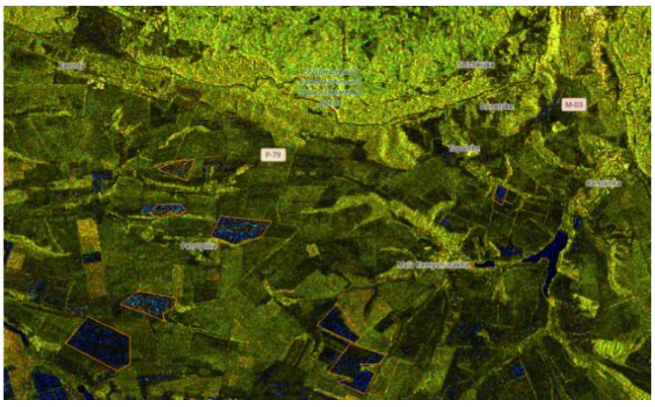


Рисунок 4 – Карта деформації прифронтових ділянок сільськогосподарського призначення Ізюмського району Харківської області
Figure 4 – Deformation map of frontline agricultural areas in the izium district of kharkiv region

На рисунку 4 представлено деформації прифронтових ділянок сільськогосподарського призначення Ізюмського району Харківської області на основі супутникового знімання Sentinel-1 IW VV+VH «Покращена візуалізація». Цей скрипт поєднує гамма0 поляризацій VV та VH у візуалізацію зі штучними кольорами. Він відображає акваторії синім (частково чорним) кольором, а сушу - різними відтінками жовтого/зеленого. Міські райони відображаються у світло-зелено-жовтому кольорі (у

напрямку до білого), ділянки з рослинністю - у гірчично-зеленому, а гола земля - у темно-зеленому. Ділянки темно фіолетового кольору не належать до ознак природних явищ снігу або води. Їхня структура порушена вирвами, траншеями, що змінило радарне зображення.

Крім того, за допомогою даних SAR можна оцінити пошкодження будівель [16]. Дослідження показали, що більшість пошкоджених будівель, виявлених за допомогою аналізу інтенсивності SAR, є середніми та великими будівлями (наприклад, багатоповерхові житлові будинки, громадські установи, комерційні будівлі, склади та виробничі споруди). Прикладом є проведена оцінка пошкоджень будівель, пов'язаних з війною, у Києві з використанням радара Sentinel-1 та оптичних зображень Sentinel-2. [17]. Для оцінки пошкоджень було використано простий та надійний логарифмічний коефіцієнт інтенсивності SAR для Sentinel-1 та текстурний аналіз для Sentinel-2. Щоб приховати зміни від інших особливостей та типів ландшафтного покриву, не пов'язаних з міськими районами, побудовано маску забудованої території з використанням контурів будівель та світового сліду поселень (WSF) Open Street Map. Точність робіт встановлена за допомогою оптичних зображень дуже високої роздільної здатності та кількісної оцінки за допомогою карти оцінки пошкоджень Центру супутникового зв'язку Організації Об'єднаних Націй (UNOSAT). Результати наукової розвідки показали, що пошкоджені будівлі зосереджені переважно в північно-західній частині досліджуваної території, де розташовані Ірпінь і сусідні міста Буча та Гостомель. Виявлені пошкодження будівель добре відповідають еталонним зображенням WorldView.

Під час війни актуальним є моніторинг стабільності критичної інфраструктури як мости, дороги, залізничні колії, дамби, газопроводи та інше. Ці об’єкти схильні до деформацій внаслідок вибухів, зміщення ґрунтів або пошкоджень від важкої техніки. Руйнування або їхнє пошкодження має катастрофічні наслідки. Саме методика використання даних InSAR дозволяє здійснювати безперервний дистанційний моніторинг стабільності таких об'єктів. Вона може виявляти мінімальні деформації, які свідчать про структурні пошкодження або зміщення фундаменту. Успішним прикладом є застосування методу диференціальної інтерферометрії для території Богородчанського підземного сховища газу. Завдяки застосованому методу, зафіксовано вертикальні рухи (осідання/підняття) гирл експлуатаційних свердловин спричинені циклічним змінам тиску в процесі технічної експлуатації газосховища. Середня величина осідання свердловин в результаті відкачування газу становила 15-19 мм; максимальна величина осідання досягла -26 мм. В період закачування газу до сховища зафіксовано підняття свердловин в середньому на 10-15 мм; максимальна величина підйому досягала +30 мм. Для покращення співвідношення сигнал-шум на радіолокаційних знімках для територій підземного сховища газу рекомендується встановлювати наземні кутові відбивачі різних конструкцій. Це особливо важливо в місцях розташування гирл свердловин та вздовж основних ліній геометричного нівелювання [3]. Підтвердженням дієвості методу в умовах війни дозволить вжити заходів для ремонту та запобігання аварійних ситуацій.

Використання методу радіолокаційної інтерферометрії забезпечує визначення зміщення земної поверхні з високою точністю. Метод забезпечує моніторинг довгострокових змін земної поверхні, спричинених військовими конфліктами, адже зміни русел річок, деградація ґрунтів, вплив на рослинність, може бути невидима на короткострокових знімках. Відзначимо, що земна поверхня вважається нестабільною, якщо ґрунт просідає більше ніж 35 мм та має швидкість осадонакопичення більше ніж 1 мм/місяць. Використання цього методу обґрунтовується тим, що дані отримуються та обробляються дистанційно та, як правило, не потребують присутності на об'єкті. Метод радіолокаційної інтерферометрії успішно застосовується в зарубіжних країнах на гірничодобувних та нафтовидобувних об'єктах [6;7;15].

Відновлення звільнених територій пов’язане з розмінуванням земельних ділянок. Безпечне проведення операцій з розмінування потребує інформації про стабільність ґрунту, з уникнення додаткових ризиків для саперів. За допомогою InSAR виявляють ділянки зі значними деформаціями ґрунту, що спричинені прихованими вибухами, мінуванням або нестабільністю, пов'язаною з порушеннями ландшафту. Ця інформація допомагає уникнути ділянок, які можуть несподівано

зрушити або обвалитися під час робіт з розмінування, оптимізувати маршрути розмінування, визначити безпечні проходи та робочі зони для персоналу і техніки.

Висновки. Супутникова інтерферометрія є важливим інструментом для оцінки деформацій земельних ділянок у зонах бойових дій. Супутники InSAR безпосередньо не вимірюють висоту чи рух землі, вони передають отримані радіолокаційні сигнали, які потім обробляються в інтерпретації зміщення (процес розгортання). Рух землі, отриманий за допомогою цього методу, є «оцінкою», а не пряме «вимірювання».

Адаптовані методи обробки InSAR даних дозволяють отримувати відомості про зміни земної поверхні. Методологічний підхід для оцінки деформацій у зонах бойових дій за допомогою InSAR є багатоетапним та передбачає принципи супутникової інтерферометрії, так і специфіку наслідків військових дій. Він включає наступні етапи: визначення та обґрунтування району дослідження; збір та попередній відбір супутникових InSAR-даних; формування інтерферограм; інтерпретація та валідація результатів аналіз обмежень та рекомендації.

Однією з ключових переваг такої технології є можливість створення карт деформації земної поверхні, цифрових моделей рельєфу (DEM), детальних цифрових моделей стабільності територій, шляхом використання фазових зрушень в радіосигналах супутника для визначення зсувів з точністю до міліметрів. Це сприяє глибшому розумінню геодинамічних процесів, моніторингу стабільності інфраструктури та ефективному плануванню відновлювальних робіт, особливо у важкодоступних або небезпечних зонах. Дає можливість не лише підвищити якість даних, але й зменшити обсяг польових робіт, що особливо важливо у зонах ведення бойових дій. Застосування цієї технології допоможе не лише оцінити масштаб руйнувань, але й мінімізувати ризики, підвищити ефективність відбудови та забезпечити безпеку людей.

Міжнародний та вітчизняний досвід демонструє ефективність впровадження методів обробки InSAR даних під час оцінки деформацій земельних ділянок. Наприклад, в Іраку ця технологія була використана для картографування пошкоджень міста Мосул, а в Україні – міст Ірпінь, Буча та Гостомель.

Попри очевидні переваги, використання супутникової інтерферометрії для оцінки деформацій земельних ділянок у зонах бойових дій супроводжується певними викликами, а саме: динамічний характер змін ландшафту, значні деформації (перевищення 2π фазового циклу), відсутність стабільних референсних точок, чутливість до погодних умов, затінення та спотворення через рельєф території та частково зруйнованої міської забудови, погана відбивна здатність рослинності.

Перспективами розвитку є використання даних із супутників нового покоління (ICEYE, Capella Space), що дозволяє вести цілодобовий, всепогодний моніторинг; інтеграція з дронами та наземними вимірюваннями; поєднання InSAR з ШІ/машинного навчання для автоматичного виявлення деформацій на великих масивах зображень (наприклад, виявлення змін, класифікація об’єктів). Це сприятиме вдосконаленню технологій отримання та обробки радіолокаційних даних і дозволить швидко визначити зони можливих деформацій земної поверхні на територіях проведення бойових дій.

Перелік посилань

1. Бурак К.О., Ковтун В.М., Дорош Л.І., Пакшин М.Ю., Ляска І. І. Геодезичний моніторинг деформацій методом радарної інтерферометрії. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings (27–28 april 2018, Brno). Brno, 2018. P. 176 -171.

2. Углицьких Є., Вижва С., Іванік О. Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні території Закарпаття за даними радарної інтерферометрії. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. Київ, 2020. № 4(91). С. 94-99.

3. Кухтар Д., Олеськів Р. Метод диференціальної радарної інтерферометрії для моніторингу територій підземного сховища газу. Технічні науки та технології. Чернігів, 2023. № 3(33). С. 235-241.

4. Нестеренко С. Використання інтерферометричних методів визначення деформацій земної поверхні. Просторове планування для майбутнього України: збірник тез Всеукраїнської науково–практичної конференції (25 – 26 травня 2023 р., м. Полтава). Полтава, 2023. С.145-148.

5. Кухтар Д. Аналіз деформацій земної поверхні у районі гірничих виробок рудника «Калуш» за даними радіолокаційного знімання 2018–2022 рр. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Львів, 2024. Вип. I (47). С. 110-117.

6. Matano F. Analysis and Classification of Natural and Human-Induced Ground Deformations at Regional Scale (Campania, Italy) Detected by Satellite Synthetic-Aperture Radar Interferometry Archive Datasets. Remote Sens. 2019. №11. P. 2822. https://doi.org/10.3390/rs11232822

7. Bonì R., Pilla G., Meisina C. Methodology for Detection and Interpretation of Ground Motion Areas with the A-DInSAR Time Series Analysis. Remote Sens. 2016. № 8. P. 686. https://doi.org/10.3390/rs8080686

8. Станкевич С. А., Свіденюк М. О., Дудар Т. В. Застосування багаточасової радарної інтерферометрії для виявлення зміщення земної поверхні для території урановидобування в Україні. Екологічна безпека. Кременчук, 2019. № 2 (28). С. 18-23.

9. Антонюк О.С. Особливості дистанційного моніторингу стану берегової зони території України. Перспективні напрямки наукових досліджень : збірник тез XIV Міжнародної науково практична інтернет-конференції (24 листопада 2017 р., м. Вінниця). Вінниця, 2017. С. 4-7.

10. Дьоміна Н. А., Морозов М. В. Комп'ютерне моделювання у супутниковій геодезії та автоматизація вимірювань. Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь, 2019. Вип. 12, том 1. С. 19-33

11. Петров С. Л. Моніторинг вертикальних зміщень техногеннонавантажених територій геодезичними методами : автореф. дис. ... канд. т. наук. Львів, 2018. 20 с.

12. Голубцов О., Сорокіна Л., Сплодитель А., Чумаченко С. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу. Київ, 2023. 32 с.

13. Третяк К., Брусак І. Сучасні деформації земної кори території заходу України за даними ГНСС мережі «GEOTERRACE». Геодинаміка. Львів, 2022 №1(32). С. 16-25

14. Dehghan-Soraki Y., Sharifikia M., Sahebi, M. R. A comprehensive interferometric process for monitoring land deformation using ASAR and PALSAR satellite interferometric data. GIScience & Remote Sensing. 2015. № 52(1). P. 58–77.

15. Mohammadimanesh F., Salehi B., Mahdianpari M., English J., Chamberland J., Alasset P. J. Monitoring surface changes in discontinuous permafrost terrain using small baseline SAR interferometry, object-based classification, and geological features: a case study from Mayo, Yukon Territory, Canada. GIScience & Remote Sensing, 2018. №56(4). P. 485–510. https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1513444

16. Boloorani AD., Darvishi M., Weng Q., Liu X. Post-War Urban Damage Mapping Using InSAR: The Case of Mosul City in Iraq. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. №10(3):140. https://doi.org/10.3390/ijgi10030140

17. Aimaiti Y., Sanon C., Koch M., Baise LG., Moaveni B. War Related Building Damage Assessment in Kyiv, Ukraine, Using Sentinel-1 Radar and Sentinel-2 Optical Images. Remote Sensing. 2022; № 14(24):6239. https://doi.org/10.3390/rs14246239.

APPLICATION OF REMOTE SENSING INTERFEROMETRY TO MONITOR LAND DEFORMATIONS IN COMBAT ZONES: METHODOLOGICAL PRINCIPLES AND APPLIED ASPECTS

Serbov Mykola G., Doctor of Economic Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Hydrometeorology and Ecology, Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine, e-mail: serbovng@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-0220-6745

Nataliia Danilova V., Candidate of Geographical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Agrometeorology and Agroecology, Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine, e-mail: nataliadanilova0212@gmail.com, http://orcid.org/0000-0003-2334-6058

Pylypiuk Viktor V., Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Land Hydrology, Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine, e-mail: pilipukvv@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-0365-4275

Summary. This article is dedicated to exploring the potential of satellite interferometry (InSAR) for assessing surface deformations in combat zones. Armed conflicts and military operations cause landscape alterations and significant ground surface deformations. In situations where traditional monitoring methods are dangerous or impossible, remote sensing approaches gain particular importance. An effective tool for detecting surface deformation is satellite interferometry, which is based on analyzing phase differences between two or more radar images acquired from the same or similar orbits at different times. The aim of this study is to develop and justify methodological approaches for assessing surface deformations in combat zones using satellite interferometry (InSAR) data, as well as to demonstrate its practical application for monitoring and analyzing the impact of military operations on land resources. The study investigates the negative and destructive consequences of military activities on the soil ecosystem. Disturbances to the soil cover of land plots are conventionally divided into two major groups: primary and secondary. It is noted that the main types of land deformation in combat zones include cratering and explosive deformations, mechanical displacements, and surface subsidence. Interferometry is considered as a synthetic aperture radar (SAR) technology that utilizes pairs or more high-resolution SAR images to generate high-quality terrain maps through phase interferometry methods. The methodological aspects of land deformation assessment in combat zones using satellite interferometry are defined. The application of InSAR requires adapting standard methodologies and considering specific contextual factors. A comprehensive methodological approach for assessing surface deformations in combat zones includes stages and elements that form the methodology for processing and interpreting InSAR data. It consists of four stages: collection and preprocessing of InSAR data; generation of interferograms; interpretation and validation of results; analysis of limitations and recommendations. Special attention is given to applied solutions involving satellite interferometry for assessing land deformation in combat areas. Satellite interferometry provides objective, regular, and safe assessment of surface conditions in combat zones by using phase shifts in satellite radio signals to detect ground displacements with millimeter-level precision.

Keywords: satellite interferometry, InSAR, surface deformations, combat zones, monitoring, remote sensing, damage assessment.

References

1. Burak K.O., Kovtun V.M., Dorosh L.I., Pakshyn M.YU., Lyaska I. I. Heodezychnyy monitorynh deformatsiy metodom radarnoyi interferometriyi. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings (Geodetic monitoring of deformations by radar interferometry. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings). (27–28 april 2018, Brno). Brno, 2018. P. 176 -171 [in Ukrainian].

2. Uhlyts′kykh YE., Vyzhva S., Ivanik O. Monitorynh vertykal′nykh zmishchen′ zemnoyi poverkhni terytoriyi Zakarpattya za danymy radarnoyi interferometriyi (Monitoring of vertical displacements of the earth's surface in the territory of Transcarpathia using radar interferometry data). Visnyk Kyyivs′koho natsional′noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiya. Kyyiv, 2020. № 4(91). S. 94-99 [in Ukrainian].

3. Kukhtar D., Oles′kiv R. Metod dyferentsial′noyi radarnoyi interferometriyi dlya monitorynhu terytoriy pidzemnoho skhovyshcha hazu (Differential radar interferometry method for monitoring underground gas storage areas). Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi. Chernihiv, 2023. № 3(33). S. 235-241[in Ukrainian].

4. Nesterenko S. Vykorystannya interferometrychnykh metodiv vyznachennya deformatsiy zemnoyi poverkhni. Prostorove planuvannya dlya maybutn′oho Ukrayiny: zbirnyk tez Vseukrayins′koyi naukovo–praktychnoyi konferentsiyi (Using interferometric methods for determining deformations of the earth's surface.

Spatial planning for the future of Ukraine: collection of abstracts of the All-Ukrainian scientific and practical conference) (25 – 26 travnya 2023 r., m. Poltava). Poltava, 2023. S.145-148 [in Ukrainian].

5. Kukhtar D. Analiz deformatsiy zemnoyi poverkhni u rayoni hirnychykh vyrobok rudnyka «Kalush» za danymy radiolokatsiynoho znimannya 2018–2022 rr. (Analysis of deformations of the earth's surface in the area of the Kalush mine workings according to radar survey data from 2018–2022) Suchasni dosyahnennya heodezychnoyi nauky ta vyrobnytstva. L′viv, 2024. Vyp. I (47). S. 110-111 [in Ukrainian].

6. Matano, F. (2019) Analysis and Classification of Natural and Human-Induced Ground Deformations at Regional Scale (Campania, Italy) Detected by Satellite Synthetic-Aperture Radar Interferometry Archive Datasets. Remote Sens. 11. 2822. [in English].

7. Bonì, R., Pilla, G., Meisina, C. (2016) Methodology for Detection and Interpretation of Ground Motion Areas with the A-DInSAR Time Series Analysis. Remote Sens. 8. 686. https://doi.org/10.3390/rs8080686 //[in English].

8. Stankevych S. A., Svidenyuk M. O., Dudar T. V. Zastosuvannya bahatochasovoyi radarnoyi interferometriyi dlya vyyavlennya zmishchennya zemnoyi poverkhni dlya terytoriyi uranovydobuvannya v Ukrayini (Application of multi-temporal radar interferometry to detect earth surface displacement for uranium mining areas in Ukraine). Ekolohichna bezpeka. Kremenchuk, 2019. № 2 (28). S. 18-23 [in Ukrainian].

9. Antonyuk O.S. Osoblyvosti dystantsiynoho monitorynhu stanu berehovoyi zony terytoriyi Ukrayiny. Perspektyvni napryamky naukovykh doslidzhen′ : zbirnyk tez KHIV Mizhnarodnoyi naukovo praktychna internet-konferentsiyi (Features of remote monitoring of the coastal zone of Ukraine. Promising directions of scientific research: collection of abstracts of the XIV International Scientific and Practical Internet Conference) (24 lystopada 2017 r., m. Vinnytsya). Vinnytsya, 2017. S. 4-7[in Ukrainian].

10. D′omina N. A., Morozov M. V. Komp″yuterne modelyuvannya u suputnykoviy heodeziyi ta avtomatyzatsiya vymiryuvan′ (Computer modeling in satellite geodesy and automation of measurements). Naukovyy visnyk TDATU. Melitopol′, 2019. Vyp. 12, tom 1. S. 19-33[in Ukrainian].

11. Petrov S. L. Monitorynh vertykal′nykh zmishchen′ tekhnohennonavantazhenykh terytoriy heodezychnymy metodamy (Monitoring of vertical displacements of technogenically loaded territories by geodetic methods) : avtoref. dys. ... kand. t. nauk. L′viv, 2018. 20 s [in Ukrainian].

12. Holubtsov O., Sorokina L., Splodytel′ A., Chumachenko S. Vplyv viyny rosiyi proty Ukrayiny na stan ukrayins′kykh gruntiv. Rezul′taty analizu (The impact of the Russian war against Ukraine on the state of Ukrainian soils.). Kyyiv, 2023. 32 s [in Ukrainian].

13. Tretyak K., Brusak I. Suchasni deformatsiyi zemnoyi kory terytoriyi zakhodu Ukrayiny za danymy HNSS merezhi «GEOTERRACE» (odern deformations of the earth's crust in the territory of western Ukraine according to GNSS data of the "GEOTERRACE" network). Heodynamika. L′viv, 2022 №1(32). S. 16-2[in Ukrainian].

14. Dehghan-Soraki, Y., Sharifikia, M., Sahebi, M. R. (2015) A comprehensive interferometric process for monitoring land deformation using ASAR and PALSAR satellite interferometric data. GIScience & Remote Sensing. 52(1). 58–77 [in English].

15. Mohammadimanesh, F., Salehi, B., Mahdianpari, M., English, J., Chamberland, J., Alasset, P. J. (2018) Monitoring surface changes in discontinuous permafrost terrain using small baseline SAR interferometry, object-based classification, and geological features: a case study from Mayo, Yukon Territory, Canada. GIScience & Remote Sensing. 56(4). 485–510 [in English].

16. Boloorani, AD., Darvishi, M., Weng, Q., Liu, X. (2021) Post-War Urban Damage Mapping Using InSAR: The Case of Mosul City in Iraq. ISPRS International Journal of Geo-Information. 10(3):140. https://doi.org/10.3390/ijgi10030140// [in English].

17. Aimaiti Y., Sanon C., Koch M., Baise LG., Moaveni B. (2022) War Related Building Damage Assessment in Kyiv, Ukraine, Using Sentinel-1 Radar and Sentinel-2 Optical Images. Remote Sensing.; 14(24):6239. https://doi.org/10.3390/rs14246239 //[in English]

УДК 528.4:332.3
UDC 528.4:332.3

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-279-284

ПЕРЕНЕСЕННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ З РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ, ПОРУШЕНИХ ВНАСЛІДОК СПОРУДЖЕННЯ СВЕРДЛОВИНИ НА МІСЦЕВІСТЬ

TRANSFER OF PROJECT SOLUTIONS TO RECLAMATION OF LAND DISTURBED AS A RESULT OF THE CONSTRUCTION OF THE WELL TO THE TERRAIN



Фролов В'ячеслав Олександрович, *кандидат технічних наук, асистент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: frolgis@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-8045-3963



Касьянов Володимир Володимирович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0003-3506-5982



Фролов Олександр В'ячеславович, *аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: frolgis@gmail.com*

https://orcid.org/0009-0003-6968-5714



Гризодуб Даріна Володимирівна, *студентка групи М ЗУК 2024-1, спеціальність «Геодезія та землеустрій», Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail:darinagrizodub94@gmail.com*

https://orcid.org/0009-0008-6952-516X

Анотація. Обґрунтована актуальність теми дослідження відносно перенесення проектних рішень з рекультивації земель, порушених внаслідок спорудження свердловини на місцевість.

У теоретико-методичних розробках представлені напрями та особливості землевпорядного проектування із реалізацією робочих проектів. Проте потребує подальшого удосконалення

перенесення проектних рішень з рекультивації земель, порушених внаслідок спорудження свердловини на місцевість.

Досягнута мета дослідження відносно розробки технологічної схеми перенесення проектних рішень з рекультивації земель, порушених внаслідок спорудження свердловини на місцевість.

Визначено, що проектні рішення, визначені робочим проектом землеустрою щодо рекультивації порушених земель, які надані для облаштування бурового майданчика, розміщення бурового обладнання та буріння розвідувальної свердловини, підлягають періодичному нагляду та контролю. Авторський нагляд за виконанням робочого проекту землеустрою щодо рекультивації порушених земель здійснюється розробниками документації із землеустрою і передбачає перевірку повноти та якості виконання заходів, окремих рішень, передбачених проектною документацією, а також вимог нормативно - правових актів з питань здійснення землеустрою. Строки здійснення авторського нагляду за виконанням проектів землеустрою визначаються відповідно до графіка реалізації проекту землеустрою. Результати, одержані під час авторського нагляду за реалізацією проекту землеустрою, заносяться в журнал авторського нагляду за виконанням проектів землеустрою. Журнал авторського нагляду за виконанням проекту землеустрою, ведеться згідно Порядку, затвердженого в існуючому законодавстві.

У результаті аналізу існуючого теоретико-методичного й законодавчого забезпечення визначенні напрями та особливості здійснення землевпорядного проектування, розробки робочих проектів й формування проектних рішень з рекультивації порушених земель. Розроблена технологічна схема перенесення проектних рішень в натуру (на місцевість), враховуючи напрями землекористування та впливу на земельний покров. Удосконалення робочого проектування надає можливості підвищити ефективність реалізації робіт із землеустрою, забезпечити здійснення заходів для зростання якісних характеристик земельних ресурсів.

Ключові слова: землеустрій, робочий проект, рекультивація земель, проектні рішення, технічнологічна схема.

Вступ. В умовах постійних трансформацій, зміни напрямів та особливостей здійснення земельних відносин, скорочення рівня ефективності використання земель, формування можливостей для застосування сучасних геоінформаційних систем і технологій виникає необхідність використання інструментарію відносно порушених земельних ресурсів. Поглиблюють представлені процеси наслідки агресії РФ й внутрішні екологічні й земельні проблеми, результатом яких є зростання площ забруднюючих територій за регіонами: Волинський, Дніпропетровський, Донецький, Житомирський, Запорізький, Київський, Луганський, Миколаївський, Одеський, Рівненський, Сумський, Харківський, Херсонський, Чернігівський. У цьому контексті потребує удосконалення та подальшого розвитку проектні рішення з рекультивації земель, реалізація напрямів щодо розробки робочих проектів. Представлені заходи є актуальними для забезпечення землевпорядного проектування та формування сучасної системи землеустрою. Таким чином, тема дослідження відносно перенесення проектних рішень з рекультивації земель, порушених внаслідок спорудження свердловини на місцевість є актуальною і має своєчасний характер.

Огляд існуючих теоретичних розробок. Теоретико-методологічна основа щодо землевпорядного проектування сформована у розробках, де основна увага сфокусована на: землевпорядне проектування визначається як процес пошуку оптимальних рішень організації використання земель, формування правового режиму землекористування та інформації для прийняття управлінських рішень [1, 2]. Землевпорядне проектування спрямовано на забезпечення територіального розвитку використання земель [3–6]. Напрями та особливості здійснення землевпорядного проектування та землекористування висвітлені у наукових роботах авторів [7–9].

У системі землекористування на сучасному етапі виникає необхідність постійних трансформацій землевпорядного проектування й застосування відповідного інструментарію [10, 11].

Узагальнюючи існуюче нормативно-правове забезпечення, визначено, що робочі проекти землеустрою розробляються з метою здійснення заходів з рекультивації порушених земель, зняття та

перенесення родючого шару ґрунту, консервації земель, поліпшення стану сільськогосподарських угідь і лісових земель, захисту земель від ерозії, підтоплення, заболочення, вторинного засолення, висушення, зсувів, ущільнення, закислення, забруднення промисловими та іншими відходами, радіоактивними та хімічними речовинами [12].

Метою розроблення робочих проектів землеустрою щодо рекультивації порушених земель є визначення основних проектних рішень, виконання яких забезпечує ефективне використання рекультивованих ділянок, встановлення обсягів, технології та черговості виробництва відновлювальних робіт, визначення кошторисної вартості рекультивації [12].

Під час рекультивації передбачається: за сільськогосподарським напрямом - створення на порушених землях сільськогосподарських угідь; за лісогосподарським напрямом - відновлення лісів (здійснюється на лісових ділянках, що були вкриті лісовою рослинністю (зруби, згарища тощо) та лісорозведення (здійснюється на призначених для створення лісів землях, не вкритих лісовою рослинністю, насамперед низькопродуктивних та непридатних для використання в сільському господарстві (яри, балки, піски тощо), на землях сільськогосподарського призначення, виділених для створення полезахисних лісових смуг та інших захисних насаджень); за рибогосподарським напрямом - створення рибогосподарських водних об'єктів (їх частин) у пониженнях техногенного рельєфу; за водогосподарським напрямом - створення водойм багатоцільового водовикористання; за рекреаційним напрямом - створення об'єктів відпочинку; за санітарно-гігієнічним напрямом - консервація порушених земель, які чинять негативний вплив на навколишнє природне середовище; за будівельним напрямом - приведення порушених земель у стан, придатний для промислового і цивільного будівництва; за природоохоронним напрямом - можливість ренатуралізації земель шляхом відновлення торфовищ, водно-болотних, лучних, степових та інших цінних природних екосистем, створення об'єктів природно-заповідного фонду (наприклад дендропарків, біосферних заповідників) [12].

У теоретико-методичних розробках представлені напрями та особливості землевпорядного проектування із реалізацією робочих проектів. Проте потребує подальшого удосконалення перенесення проектних рішень з рекультивації земель, порушених внаслідок спорудження свердловини на місцевість.

Метою дослідження є розробка технологічної схеми перенесення проектних рішень з рекультивації земель, порушених внаслідок спорудження свердловини на місцевість.

Виклад основного матеріалу. Землевпорядні роботи з рекультивації, технологічні процеси виконуються з обов'язковою прив'язкою до місцевості. Для цього розробляється схема перенесення проектних рішень в натуру (на місцевість) (рис. 1).

Проектні рішення, визначені робочим проектом землеустрою щодо рекультивації порушених земель, які надані для облаштування бурового майданчика, розміщення бурового обладнання та буріння розвідувальної свердловини, підлягають періодичному нагляду та контролю.

Авторський нагляд за виконанням робочого проекту землеустрою щодо рекультивації порушених земель здійснюється розробниками документації із землеустрою і передбачає перевірку повноти та якості виконання заходів, окремих рішень, передбачених проектною документацією, а також вимог нормативно - правових актів з питань здійснення землеустрою.

Строки здійснення авторського нагляду за виконанням проектів землеустрою визначаються відповідно до графіка реалізації проекту землеустрою.

Результати, одержані під час авторського нагляду за реалізацією проекту землеустрою, заносяться в журнал авторського нагляду за виконанням проектів землеустрою. Журнал авторського нагляду за виконанням проекту землеустрою, ведеться згідно Порядку, затвердженого в існуючому законодавстві.

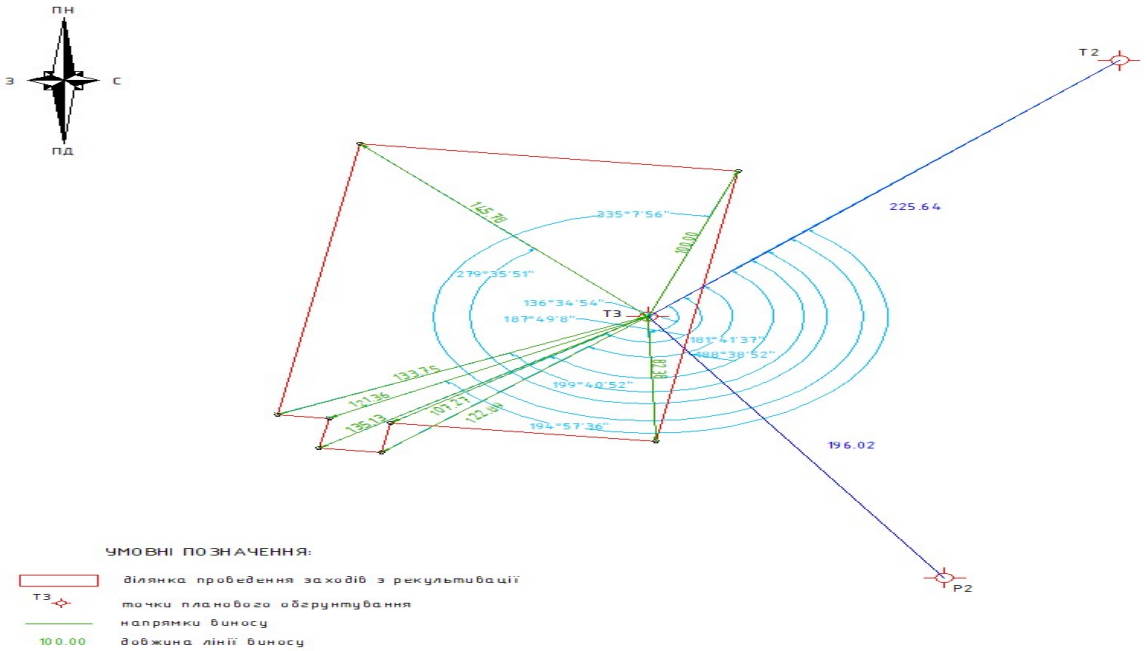


Рисунок 1 – Технологічна схема перенесення проектних рішень в натуру (на місцевість)
Figure 1 – Technological scheme for transferring design solutions to nature (on the ground)

Висновки. Таким чином, у результаті аналізу існуючого теоретико-методичного й законодавчого забезпечення визначенні напрями та особливості здійснення землевпорядного проектування, розробки робочих проектів й формування проектних рішень з рекультивації порушених земель. Розроблена технологічна схема перенесення проектних рішень в натуру (на місцевість), враховуючи напрями землекористування та впливу на земельний покров. Удосконалення робочого проектування надає можливості підвищити ефективність реалізації робіт із землеустрою, забезпечити здійснення заходів для зростання якісних характеристик земельних ресурсів.

Перелік посилань

1. Третяк А. М. Теоретичні основи землеустрою. Київ: ІЗУ УААН, 2002.152 с.
2. Третяк А. М. Землевпорядне проектування: теоретичні основи і територіальний землеустрій: навч. Посібник. Київ: ТОВ «ЦЗРУ», 2008. 576 с.
3. Мамонов К. А., Гой В. В., В'яткін Р. С., Ковальчук В. С. Оцінка використання земель із застосуванням методу експертних оцінок у системі територіального розвитку регіонів. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2024. Випуск 210. С. 126–134. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320685
4. Мамонов К. А., Метешкін К. О., Штерндок Е. С., Ковальчук В. С. Моделювання і дослідження складних кадастрових систем нерухомості для забезпечення територіального розвитку. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2024. Випуск 116. Частина 2. С. 135–143. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.2/135.pdf
5. Mamonov K., Kondrashchenko E., Pilicheva M., Goi V. A scenario approach to ensuring the territorial development of land use in regions. Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура. 2024. Том 6. Вип. 187. С. 195–198. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6407/6328
6. Мамонов К. А., Ковальчук В. С., Гой В. В., Мамонов В. К. Містобудівні чинники територіального розвитку використання земель регіонів. Науковий вісник будівництва. 2024. Випуск № 111. С. 154–159. URL: https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1804/1769

7. Пілічева М. О., Анопрієнко Т. В., Маслій Л. О. Земельно-кадастрові роботи : навч. Посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 239 с.
8. Про землеустрій. Закон України від 22.05.2003 р. № 858-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text
9. Грещук Г. І. Розвиток системи планування сталого використання та охорони сільськогосподарських земель. Агросвіт. 2018. Вип. 24. С. 23–29. URL: http://www.agrosvit.info/pdf/24_2018/5.pdf
10. Третяк А. М., Третяк В. М., Гунько Л. А. Інституціональний розвиток землеустрою та землевпорядкування в Україні у період глобалізації. Економіка та держава. 2022. Вип. 2. С. 19–25. URL: http://www.economy.in.ua/pdf/2_2022/6.pdf
11. Пілічева М. О., Анопрієнко Т. В. Сучасні тенденції у сферах геодезії, землеустрою, земельного кадастру та містобудування. Комунальне господарство міст. Серія Технічні науки та архітектура. 2022. Вип. 4 (164). С. 136–143. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5832/5751
12. Про затвердження Правил розроблення робочих проектів землеустрою. Постанова Кабінету Міністрів Украхни. Документ № 86-2022-п. Редакція від 05.11.2022. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/86-2022-п#Text

TRANSFER OF PROJECT SOLUTIONS TO RECLAMATION OF LAND DISTURBED AS A RESULT OF THE CONSTRUCTION OF THE WELL TO THE TERRAIN

Frolov Viacheslav O., Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: frolgis@gmail.com, тел. +380509816112, https://orcid.org/0000-0001-8045-3963

Kasyanov Vladimir V., Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3506-5982

Frolov Oleksandr V., Postgraduate student of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: frolgis@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-6968-5714

Hryzodub Darina V., Student of Group M ZUK 2024-1, specialty «Geodesy and Land Management», O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: darinagrizodub94@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-6952-516X

Summary. The relevance of the topic of research on the transfer of project decisions on reclamation of land disturbed as a result of the construction of the well to the terrain.

The theoretical and methodological developments presents directions and features of land management design with the implementation of working projects. However, it requires further improvement of the transfer of project decisions on reclamation of land disturbed as a result of the construction of the well to the terrain.

The purpose of the study was achieved regarding the development of technological scheme for the transfer of project solutions for reclamation of land disturbed as a result of the construction of the well to the terrain.

It is determined that the design solutions determined by the working project of land management for the reclamation of the broken land provided for the arrangement of the drilling ground, the placement of drilling equipment and the drilling of reconnaissance wells are subject to periodic supervision and control. The author's supervision over the implementation of the working project of land management on the reclamation of the violated land is carried out by the developers of documentation on land management and provides for the verification of the completeness and quality of the implementation of measures, separate decisions provided by the project documentation, as well as the requirements of regulatory acts on land management. The terms of the author's supervision over the implementation of land management projects are determined in accordance with the schedule of land management project. The results obtained during the author's supervision of the implementation of the land management project are recorded in the magazine of the copyright supervision of

the implementation of land management projects.The magazine supervision of the project of land management is maintained in accordance with the procedure approved in existing legislation.

As a result of the analysis of the existing theoretical and methodological and legislative support the directions and features of land management design, development of working projects and the formation of design decisions on reclamation of disturbed land. The technological scheme of transfer of project solutions to nature (on the ground) was developed, taking into account the directions of land use and influence on land cover. Improvement of work design makes it possible to increase the efficiency of land management work, to ensure the implementation of measures to increase the quality characteristics of land resources.

Keywords: land management, working project, land reclamation, design solutions, technical scheme.

References

1. Tretiak, A. M. (2002) Theoretical foundations of land management. Kyiv: IDU UAAS, 152 p.
2. Tretiak, A. M. (2008) Land Management Design: Theoretical Foundations and Territorial Land Management: Educ. Manual. Kyiv: ZSRU LLC, 576 p.
3. Mamonov, K. A., Goi, V. V., Viatkin, R. S., Kovalchuk, V. S. (2024) Evaluation of land use using the method of expert assessments in the system of territorial development of regions. Collection of scientific works of UkrDuzt. Issue 210. Pp. 126–134. https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320685 [in Ukrainian].
4. Mamonov, K. A., Meteshkin, K. O., Shterndok, E. S., Kovalchuk, V. S. (2024) Modeling and research of complex cadastral real estate systems to ensure territorial development. Automobile roads and road construction. Issue 116. Part 2. Pp. 135–143. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.2/135.pdf [in Ukrainian].
5. Mamonov, K., Kondrashchenko, E., Pilicheva, M., Goi, V. (2024) A scenario approach to ensuring the territorial development of land use in regions. Communal management of cities. Series: Engineering Sciences and Architecture. Volume 6. Iss. 187. Pp. 195–198. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6407/6328 [in Ukrainian].
6. Mamonov, K. A., Kovalchuk, V. S., Goi, V. V., Mamonov, V. K.(2024) Urban planning factors of territorial development of land use of regions. Scientific Bulletin of Construction. Issue № 111. Pp. 154–159. https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1804/1769 [in Ukrainian].
7. Pilicheva, M. O., Anoprienko, T. V., Masliy, L. O. (2020) Land Cadastral Works: Educ. Manual. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 239 p.
8. About land management. Law of Ukraine of 22.05.2003 № 858-IV. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text [in Ukrainian].
9. Hreshchuk, H. I. (2018) Development of Sustainable Use and Protection of Agricultural Land Protection. Agrosvit. Iss. 24. Pp. 23–29. http://www.agrosvit.info/pdf/24_2018/5.pdf [in Ukrainian].
10. Tretiak, A. M., Tretiak, V. M., Gunko, L. A. (2022) Institutional development of land management and land management in Ukraine in the period of globalization. Economics and state. Iss. 2. Pp. 19–25. http://www.economy.in.ua/pdf/2_2022/6.pdf [in Ukrainian].
11. Pilicheva, M. A., Anoprienko, T. V. (2022) Modern trends in the fields of geodesy, land management, land cadastre and urban planning. Communal management of cities. Series of Technical Sciences and Architecture. Iss. 4 (164). Pp. 136–143. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5832/5751 [in Ukrainian].
12. On approval of the rules of development of working projects of land management. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. Document № 86-2022-p. Editorial from 05.11.2022. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/86-2022-п#Text [in Ukrainian].

УДК 532.5+624.21.8 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-285-296**
UDC 532.5+624.21.8

РОЗМИВ ГРУНТУ ПРИ ГРУПОВОМУ РОЗТАШУВАННІ МОСТОВИХ ОПОР

SOIL ERASING DURING GROUP PLACEMENT OF BRIDGE SUPPORTS



Воскобійник Володимир Анатольович, *доктор технічних наук, Завідува відділу, Відділ гідродинаміки хвильових та руслових потоків, Інституту гідромеханіки НАН України. e-mail: vlad.vsk@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0003-2161-6923



Онищенко Артур Миколайович, *доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд,професор Національний транспортний університет, Київ, Україна, e- mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, тел. +380687771899,*

https://orcid.org/0000-0002-1040-4530



Аксьонов Сергій Юрійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e- mail: Aksenov121@gmail.com, тел. +380971534406,*

https://orcid.org/0000-0002-6749-3909



Чиженко Наталія Петрівна, *кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: chyzhenko_np@ukr.net, тел. +380507355080,*

https://orcid.org/0000-0002-9152-2474



Ворошнов Сергій Миколайович, *кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail:voroshnov52@ukr.net, тел.+38067709707,*

https://orcid.org/0000-0003-0642-8289



Труденко Денис Володимирович*, аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд. Національний транспортний університет. e- mail: tdv.83@ukr.net*

http://orcid.org/0009-0001-3720-1952

Анотація. Однією із причин руйнування гідротехнічних споруд є розмив ґрунту, що утворюється під дією спряженої течії поблизу погано обтічних тіл, які мають місце у ході будівництва та експлуатації мостових переходів через водні перешкоди, при встановленні бурових опор і основ вітроенергетичних установок у шельфовій зоні, будівництві причальних споруд на ґрунті. У зв'язку з цим значна кількість експериментальних і теоретичних робіт спрямовано на вивчення явища локального розмиву та розробки засобів і методів його зниження, що є надзвичайно актуальним.

Процес утворення отворів розмиву ґрунту поблизу погано обтічних тіл, встановлених на розмивний ґрунт, обумовлений формуванням і подальшим розвитком системи підковоподібних вихрових структур і слідних вихорів, що формуються навколо обтічної конструкції поблизу її сполучення з дном. Основний механізм, відповідальний за формування і розвиток отвору розмиву, включає направлений на дно потік у передній або фронтальній частині опори, разом з формуванням системи підковоподібних вихрових структур поблизу основи опори і слідними вихорами, які відриваються від поверхні опори.

Метою роботи є визначення особливостей розмиву ґрунту при груповому розташуванні мостових опор за допомогою лабораторних експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження особливостей формування розмиву ґрунту під час групового розташування опор двох мостових переходів, які знаходилися у сліді одне за одним, проводилися на моделях опор в лабораторних умовах в гідродинамічному каналі з застосуванням методів візуальних та інструментальних досліджень. Гідродинамічні характеристики вихрових і струменевих течій було отримано з застосуванням спеціально розроблених і виготовлених датчиків швидкості та тиску, а параметри і форма розмивів була визначена за допомогою датчиків глибини розмиву ґрунту.

Експериментальні дослідження дозволили визначити особливості формування розмиву ґрунту навколо групової конструкції мостових опор. Отримано профілі локальних розмивів ґрунту перед фронтальною частиною призматичної опори в залежності від швидкості спряженої течії, глибини потоку та чисел Фруда для поодинокого розташування опор верхнього за потоком мостового переходу та сумісного розташування опор двох мостових переходів. Наведено особливості формування розмивів і намивів ґрунту поблизу опор мостових переходів в аксонометричному представленні.

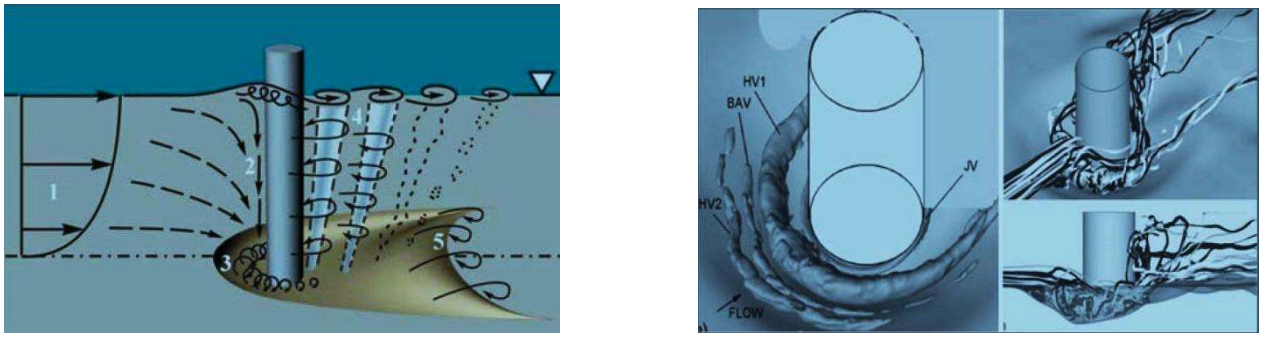
В результаті досліджень установлено, що взаємне розташування моделей опор двох мостових переходів приводить до суттєвих змін розмиву перед призматичними опорами першого за потоком мостового переходу. Так, локальний розмив збільшився на 15% за надкритичними швидкостями течії на мілкій воді і зменшився майже на 20% за докритичними швидкостями на глибокій воді Показано, що профілі розмиву ґрунту мають дві характерні ділянки з різними кутами нахилу фронтальної поверхні отвору розмиву, які обумовлені формуванням двох систем квазістійких великомасштабних підковоподібних структур.

Ключові слова: локальний розмив, призматична опора, трирядний ростверк, підковоподібний вихор, профіль розмиву, мостовий перехід.

Вступ. Розмив ґрунту утворюється під дією спряженої течії поблизу погано обтічних тіл, які мають місце у ході будівництва та експлуатації мостових переходів через водні перешкоди, при встановленні бурових опор і основ вітроенергетичних установок у шельфовій зоні, будівництві причальних споруд на ґрунті [1-4]. В результаті в області сполучення дна водойми з обтічними мостовими опорами утворюються локальні або місцеві розмиви ґрунту, які є причиною підмивання опор та нерідко аварії мостових переходів [5-7]. Так, наприклад, в роботі [8] проведений аналіз причин руйнування 1716 мостів, які було зруйновано за останні 200 років у США, Китаї та інших країнах. Результати аналізу показали, що понад 30% руйнувань мостів викликані розмивом мостових опор. У зв'язку з цим значна кількість експериментальних і теоретичних робіт спрямовано на вивчення явища локального розмиву та розробки засобів і методів його зниження, що є надзвичайно актуальним в

будівництві та експлуатації мостових переходів, видобутку корисних копалин і виробництві відновлюваної енергетики з використанням морських платформ у шельфовій зоні.

Проблематика. Процес утворення отворів розмиву ґрунту поблизу погано обтічних тіл, встановлених на ґрунт, що розмивається, обумовлений формуванням і подальшим розвитком системи підковоподібних вихрових структур і слідних вихорів, що формуються навколо обтічної конструкції поблизу її сполучення з дном [9-11]. Еволюція вихрових структур навколо групової пальової споруди має багато спільного з утворенням підковоподібних або намисто подібних вихрових систем, що виникають при обтіканні поодиноких погано обтічних конструкцій або опор, які встановлюються на дні річкових русел і каналів. Для того, щоб зрозуміти механізм розмиву, в першу чергу потрібно якісно описати структуру когерентних вихорів, які утворюють підковоподібну або слідну вихрову структуру, для різних режимів течії та кількісно охарактеризувати цей ефект у потоці та на дні річки поблизу основи опори, незалежно від її форми та розміру. Тривимірність і нестійкий характер поля течії, що формується розмивом [12- 14], спричиняють значні труднощі щодо механізмів розмиву ґрунту в місцях сполучення опор з дном.



а б

Рисунок 1 – Схема формування розмиву та намиву грунту (а) та схема генерації підковоподібних і слідних вихрових структур (б)
Figure 1 – Scheme of the formation of erosion and soil washing (a) and scheme generation of horseshoe-shaped and trailing vortex structures (b)

Структура турбулентності, що має широкий спектр турбулентних масштабів, властива вихровій течії навколо погано обтічного тіла і керує виносом і переміщенням грунту з отвору розмиву [15-17]. Дійсно поле течії в отворі розмиву навколо опори, як і навколо, наприклад, циліндра, встановленого на жорстку (не розмивну) поверхню, насичене організованими когерентними структурами у вигляді підковоподібних вихорів в основі опори, великомасштабних згортків у сліді позаду опори і більш дрібних за розміром, але дуже інтенсивних вихорів, що відриваються від погано обтічного тіла [18, 19] (рис. 1). Для того щоб зрозуміти, як течія розмиває ґрунт навколо опори потрібно вивчити і описати структуру цих великомасштабних когерентних вихрових структур і дрібномасштабних вихорів, а також визначити механізм їх взаємодії з обтічною поверхнею опори та ґрунтом на різних стадіях процесу розмиву.

Основний механізм, відповідальний за формування і розвиток отвору розмиву (рис. 1а), включає направлений на дно потік у передній або фронтальній частині опори (2), разом з формуванням системи підковоподібних вихрових структур (3) поблизу основи опори і слідними вихорами (4), які відриваються від поверхні опори [18, 19, 20]. В результаті взаємодії відривної та спадаючої течії перед опорою, системи підковоподібних вихорів і слідних вихорів ґрунт перед опорою розмивається, а позаду неї утворюється намив ґрунту (5) у вигляді дюн або рифелів. Підковоподібна вихрова структура обумовлена відривом примежового шару, що натікає на опору (1), внаслідок дії негативного градієнта тиску, що генерується поблизу фронтальної частини опори.

Взаємодія примежового шару з поверхнею опори змушує структуру турбулентності перебудуватися поблизу передньої частини опори в місці сполучення її з дном в ряд намисто подібних вихорів, що огинають опору [21-23]. Ці вихрові структури під час пересування витягуються навколо опори, через бічні градієнти тиску. Розташування, розмір та інтенсивність підковоподібних вихорів значною мірою змінюються у часі залежно від стадії чи фази їх формування чи розвитку [24-27]. При цьому додатково спостерігається значне збільшення турбулентної кінетичної енергії, рівнів пульсацій швидкості та тиску, а також придонних зсувних напруг усередині та поблизу підковоподібної вихрової області.

Експериментальні та чисельні дослідження [13, 20, 28, 29] показують, що структура підковоподібної вихрової системи сильно залежить від числа Рейнольдса та характеристик примежового шару, що формується перед обтічною перешкодою. Структура підковоподібної вихрової системи, наприклад, для режиму ламінарного обтікання складається з низки основних великомасштабних вихорів [7, 13] (рис. 1б). Первинний вихор (HV1) розташовується в середній позиції, тоді як кутовий вихор (JV) знаходиться найближче до опори. Вторинний вихор (HV2), що розвивається, формується на позиції, що знаходиться на найбільшій відстані від поверхні обтічної опори. Між первинним і вторинним вихором генерується придонний приєднаний вихор (BAV). Вихор, що розвивається, породжується примежовим шаром, який відривається від обтічної поверхні дна. Цей вихор поступово переноситься вниз потоком і, зрештою, стає новим первинним вихором. У цей час первинний вихор конвектує у напрямку до кутового вихора і поступово зливається з ним. Процес цей є періодичним [7, 13, 30, 31], генеруючи низькочастотні коливання вихрової течії як навколо погано обтічних тіл, встановлених як на жорстку поверхню, так на розмивний грунт.

Групування опор призводить до зміни глибини локального розмиву та формування глобального розмиву ґрунту, що обумовлено взаємним впливом вихрової течії навколо окремих опор, які формують групову конструкцію [32-36]. Так, при слідному групуванні циліндричних опор (відстань близько 5 діаметрів один від одного), локальний розмив ґрунту у фронтальній частині поблизу першої за напрямом течії опори збільшується майже на 20%. В роботах [34, 37] показано, що процес формування отвору розмиву по часу ділиться на три стадії: початковий, той, що має розвиток та рівноважний. В дослідженнях [36] визначено, що часові зміни глибини розмиву на передній та задній палях суттєво відрізняються для малих значень числа Фруда. Рівноважна глибина розмиву групи паль зменшується зі зменшенням розділення між палями, а глибина розмиву на задній палі, очевидно, менша, ніж на передній палі. Критичне значення розділення між палями, що відображає ефект групи паль, має тенденцію до збільшення зі збільшенням числа Фруда. Під час групового розташування паль в конфігурації 5*3 палі, які розташовано з боків від центральних паль, призводять до більше глибоких і ширших отворів розмиву відносно однорядної конфігурації паль 5*1 роботах [37,]. Визначено, що часова еволюція глибини розмиву для паль, розташованих нижче за течією, у груповій конструкції суттєво відрізняється від еволюції глибини розмиву для однієї палі залежно від значень інтенсивності потоку роботах [34]. Взаємодія групи мостових опор, що мають неоднакову форму конструкції, а також слідове розташування опор паралельних та близько розташованих

мостових переходів, практично не вивчено та літературних даних для таких конструктивних рішень наведено недостатньо. Це зумовлює необхідність проведення чисельних та експериментальних досліджень на вирішення такого класу завдань.

Мета роботи, є визначення особливостей розмиву ґрунту при груповому розташуванні мостових опор за допомогою лабораторних експериментальних досліджень.

Матеріали і методи. Експериментальні дослідження особливостей формування отворів розмиву навколо групової конструкції моделей мостових переходів проводилися в лабораторних умовах за допомогою візуальних досліджень та інструментальних вимірювань полів швидкості, тиску та глибини розмивів в околі групи опор призматичної та циліндричної форми. Моделювання виконувалося у зменшеному масштабі існуючих і спроектованих мостових переходів, які було

зроблено з призматичних опор, у сліді яких на відстані близько трьох довжин опори розташовувалися опори іншого мостового переходу з опорами у вигляді трирядного ростверку.

Для виконання фізичного моделювання взаємодії спряжених течій навколо опор двох мостових переходів було створено експериментальний стенд на базі гідродинамічного лотка, в якому розташовувалися групові конструкції опор. Гідродинамічний лоток, що мав довжину робочої ділянки близько 14 м, ширину – 1,5 м і глибину – 0,65 м. Вода в лоток подавалася за допомогою насоса, що знаходився на відстані більше 30 м від робочою ділянки. Вода подавалася на проміжний гідравлічний канал довжиною близько 20 м, де збурення течії , що генерувалися в потік насосом, згасали. Далі вода надходила у водозбірник, що мав форму добре обтічного конфузора, перед робочою ділянкою, який було обладнано хонейкомбами і сітчастими пристроями, які спрямляли та направляли потік. Позаду прямолінійної робочої ділянки розташовувався зливний водозбірник у вигляді дифузора з регульованою системою скидання води в підземне водосховище, розташоване під гідравлічною лабораторією, з якого воду качав насос для проведення досліджень. Таким чином, в експериментах використовувалася вода, що мала постійну температуру, а отже, і кінематичну в'язкість.



а б

Рисунок 2 – Розташування групи моделей призматичних опор (а) та моделей опор двох мостових переходів (б) на плоскому піщаному дні гідродинамічного лотка

Figure 2 – *L*ocation of a group of models of prismatic supports (a) and models of supports of two bridge crossings (b) on a flat sandy bottom of a hydrodynamic trough

На відстані близько 8 м від початку робочої ділянки гідродинамічного лотка розташовувалися три пари моделей мостових опор, засипані просіяним кварцовим піском на висоту близько 0,2 м від дна лотка. У дослідженнях пісок формувався у вигляді плоского дна і як модель існуючого рельєфного дна досліджуваної ділянки русла Дніпра. Приклад фотографії розмитого ґрунту поблизу мостових опор для плоского дна показано на рис. 2. Опори у вигляді прямокутних призм першого мостового переходу розташовувалися вище за течією від мостових опор у вигляді трубчастого трирядного ростверку другого мостового переходу. Ширина прямокутника $b_1=40*10^{-3}$ м, а довжина $a_1=95*10^{-3}$ м, ширина ростверку $b_2=40*10^{-3}$ м,, а довжина $a_2=200*10^{-3}$ м, діаметр циліндричної опори ростверку $D=10*10^{-3}$ м. Відстань між осями моделей мостових опор становила $l_x=0,31$ м і $l_y=0,35$ м, де x – поздовжня координата у напрямку швидкості набігаючого потоку (U), а y і z – поперечні координати. Глибина і швидкість набігаючого потоку регулювалися за допомогою засувки в системі скидання води і числом оборотів двигуна відцентрового насоса. Середній розмір зерен кварцового піску становив $d_{50}=0,35*10^{-3}$ м. У ході вимірювань глибина потоку (H) змінювалася від 0,17 м до 0,34 м, а середньовитратна швидкість (U) від 0,15 м/с до 0,59 м/с.

Перед тим як провести вимірювання гідродинамічних характеристик течії навколо групової конструкції моделей мостових опор та визначити особливості взаємодії спряженої течії з

призматичними та трирядними циліндричними опорами було проведено візуальні дослідження. Тривимірний характер полів швидкостей, властивий обтіканню мостових опор, вивчався за допомогою візуалізації потоку контрастними речовинами, такими як кольорові водорозчинні фарби та чорнило, а також алюмінієва пудра. Кольорові барвники вводилися в потік і одночасно реєструвалися цифровими відео і фотокамерами. Отримані кадри та знімки реєструвалися та оброблялися на персональних комп'ютерах із застосуванням відповідних редакторів та програм. Крім барвників у потік вводилися контрастні частинки нейтральної плавучості і застосовувалася методика реєстрації руху шовковинок (кольорові шовкові нитки), які набували форми траєкторій руху вихрових структур. Використання мічених частинок під час проведення відео зйомки дозволило визначити як амплітуду, так і напрямок руху цих частинок, які відображали поле швидкостей в досліджуваній області вихрової течії.

За допомогою мікровертушок і мініатюрних термісторних датчиків швидкості вимірювали осереднені та пульсаційні складові швидкості течії. Мікровертушки та термістори переміщалися за допомогою відповідних добре обтічних державок та кронштейнів у характерні місця вимірювань полів швидкостей. Мікровертушки діаметром близько 10-3 м вимірювали середні швидкості набігаючого потоку. Виміряні дані дозволили побудувати профілі швидкості і визначити середньовитратну швидкість набігаючого потоку. Мініатюрні термісторні датчики (діаметр чутливої поверхні термісторних елементів складав 0,8*10-3 м) були об'єднані в кореляційні блоки, щоб визначити напрямок вихрової течії та дали можливість вимірювати середні та пульсаційні складові швидкості. Малі розміри цих датчиків дозволили вводити мінімальні збудження у вихровий рух, який властивий обтіканню мостових опор. Просторово тимчасова кореляція пульсацій швидкості, виміряна ансамблем термісторних датчиків, дала можливість оцінити кінематичні характеристики вихрових структур і струменевих течій, що формуються та розвиваються всередині отворів розмиву і в околі мостових опор.

Для вимірювання глибини розмиву ґрунту та форми отвору розмиву було розроблено і виготовлено систему датчиків глибини розмиву на базі п’єзорезистивних датчиків статичного тиску. В основу роботи датчика було покладено механізм вимірювання глибини, де знаходиться чутливий елемент датчика повного тиску. Датчик тиску був закріплений на видовженому жорсткому стрижні, який опускався на поверхню отвору розмиву. Стрижень був використаний тонким для зменшення його впливу на вихровий рух у вимірюваній області отвору розмиву. На кінці стрижня поміщався наконечник у вигляді напівсфери для того, щоб стрижень під вагою датчика тиску не поринав у піщане дно лотка. У вимірах використовувався ансамбль із чотирьох датчиків глибини розмиву, рознесених на відому відстань один від одного. Конструкція вимірювального блоку дозволяла вільно переміщатися під власною вагою датчиків розмиву у напрямних отворах добре обтічних державках. При переміщенні вимірювального блоку до дна лотка датчики розмиву по черзі зупинялися у своєму переміщенні на тій глибині, де проводяться вимірювання. Після зупинки останнього датчика переміщення вимірювальної конструкції припинялося. Дані глибини переміщення датчиків передавалися через відповідний багатоканальний аналогово-цифровий перетворювач на персональний комп'ютер, де по моменту зміни наростання тиску, що реєструвалася кожним із вимірювальних датчиків, визначалася глибина розмиву грунту. За виміряними глибинами будувався профіль отвору розмиву в різних перерізах поблизу мостових опор. Ці виміри проводилися періодично у міру проведення експериментальних досліджень, що дозволяло визначити глибину розмиву та її рельєф залежно від часу вимірів.

Крім цієї системи вимірювання глибини та форми розмиву за допомогою датчиків статичного тиску було також розроблено і виготовлено спеціальний датчик, який також дозволяв виміряти глибину розмиву. Чутливим елементом цього датчика було використано п’єзокераміку, що застосовувалася в конструкціях мініатюрних п’єзокерамічних датчиках пульсацій тиску з діаметром чутливої поверхні, який дорівнював 1,3*10-3 м [38, 39]. В основу роботи цього датчика було покладено механізм різкої зміни акустичного імпедансу під час торкання чутливої поверхні датчика

піщаної поверхні отвору розмиву. Датчик пульсацій тиску заглиблювався до піщаного дна за допомогою добре обтічної державки, яку буле закріплено на тастері зі шкалою поділу точністю до 0,1*10-3 м. Тастер опускав датчик глибини розмиву до торкання з піщаною поверхнею до тих пір поки на осцилоскопі, який було під'єднано до датчика, не виникав різкий сплеск у показниках осцилограми. По шкалі тастера відраховувалася глибина занурення датчика пульсацій тиску до поверхні отвору розмиву. Вся ця система була встановлена на координатному пристрої, який дозволяв визначити просторові координати точок вимірювання глибини та форми отвору розмиву.

Після закінчення експериментальних досліджень та висихання, отриманого в ході вимірювань, рельєфу дна проводилася фотозйомка та виміри характерних особливостей дна (профілі дюн, отворів розмивів). Вимірювання рельєфу дна проводилися за допомогою голчастих датчиків, що переміщуються тастером.

Результати дослідження. Залежності профілів локального розмиву ґрунту перед фронтальною частиною для одиночної призматичної опори (в площині її осьової симетрії) для різних глибин і швидкостей потоку показані на рис. 3а, для конструкції взаємного розташування мостових опор (призматичної та ростверку) – на рис. 3б. Так, на рис. 3а крива 1 виміряна для швидкості течії U=0,27 м/с, глибини потоку H=0,2 м і числа Фруда $Fr=U/(gH)^{1/2}$=0,19; крива 2 - U=0,59 м/с, H=0,2 м та Fr=0,42; крива 3 - U=0,23 м/с та H=0,33 м і Fr=0,13 та крива 4 - U=0,32 м/с та H=0,34 м і Fr=0,18.

а б

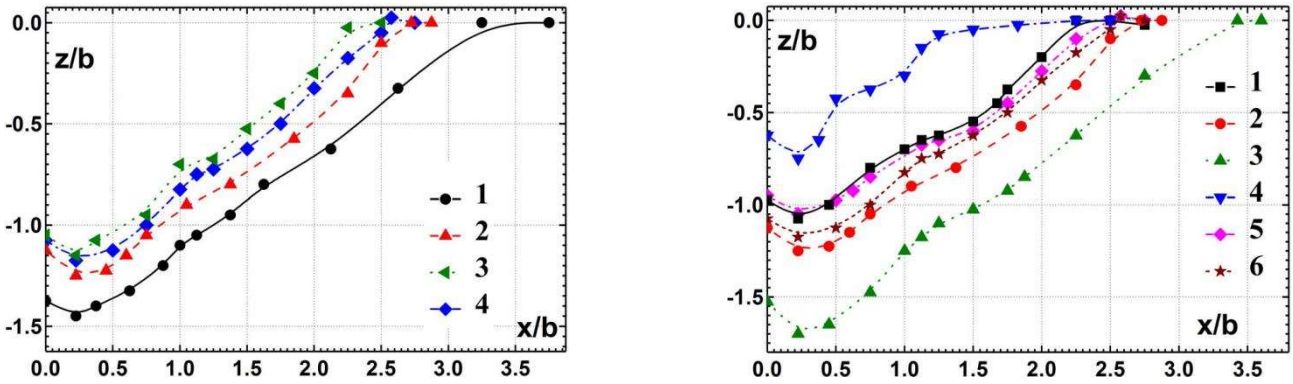


Рисунок 3 – Профілі локального розмиву ґрунту перед призматичною опорою під час обтікання одного мостового переходу (а) та взаємного розташування двох мостових переходів (б)
Figure 3 – Profiles of local soil erosion in front of a prismatic support during flow around one bridge crossing (a) and mutual location of two bridge crossings (b)

Слід зазначити, що профілі розмиву ґрунту мають дві характерні ділянки заглиблення з різними кутами нахилу. Вони зумовлені формуванням двох систем квазістійких великомасштабних підковоподібних вихрових структур. При цьому вихрова структура, яка розташована ближче до опори і знаходиться глибше, має менший масштаб. Вона розмиває і менше за розмірами заглиблення. Перед опорою, у місці сполучення поверхні опори та дна, на всіх профілях реєструється намивання ґрунту. Також між двома ділянками заглиблення, що формуються підковоподібними структурами, у профілі розмиву спостерігається намивання піску. Це намивання піску поділяє два схили заглиблення і при візуальному спостереженні має досить чіткі обриси, хоча і має характер, що осцилює в просторі, який відповідає частотам коливань вихрових структур. Результати досліджень показують, що зі збільшенням швидкості обтікання та зменшенням глибини потоку, розмив збільшується. Ширина отвору розмиву майже в (2-2,5) рази більша за глибину розмиву і максимальна глибина

спостерігається перед призматичною опорою на віддаленні близько 0,25 ширини опори. Розташування моделі другого мостового переходу позаду опор першого моста, призвело до змін у профілях розмиву, що проілюстровано на рис. 3б. Тут крива 1 отримана для швидкості течії U=0,17 м/с, глибини потоку H=0,17 м і числа Фруда Fr=0,13; крива 2 - U=0,30 м/с, H=0,19 м та Fr=0,21; крива 3 - U=0,57 м/с, H=0,18 м та Fr=0,44; крива 4 - U=0,16 м/с, H=0,31 м та Fr=0,09; крива 5 - U=0,20 м/с, H=0,34 м та Fr=0,11 і крива 6 - U=0,31 м/с, H=0,32 м та Fr=0,18. Взаємодія двох конструкцій мостових опор не призводить до суттєвих змін характеру та механізму формування розмиву перед призматичною опорою. Також на розмив ґрунту найбільший вплив мають підковоподібні вихрові структурами, що формуються під час відриву примежового шару з верхньої передньої кромки заглиблення і під час взаємодії набігаючого потоку і фронтальної поверхні призматичної опори. При порівнянні профілів розмиву, представлених на рис. 3а та рис. 3б, можна визначити наступне. Внесення в потік моделей опор другого мостового переходу призводить до збільшення розмиву майже на 15% за надкритичними швидкостями потоку (U/Vc□1.8) для неглибокої води (див., наприклад, криву 2 на рис. 3а і криву 3 на рис. 3б), де критична швидкість початку переміщення частинок ґрунту (Vc), визначеної залежністю Vc=6.19H1/6d 1/3[40]. Цей режим обтікання відповідає 50 випадку течії з ґрунтом, що переміщається. Для режиму обтікання, так званого чистої води (U/Vc<1), глибина розмиву зменшується майже на 20 % (крива 4 на рис. 3а і крива 6 на рис. 3б) за спільного розташування опор двох мостових переходів.

а б

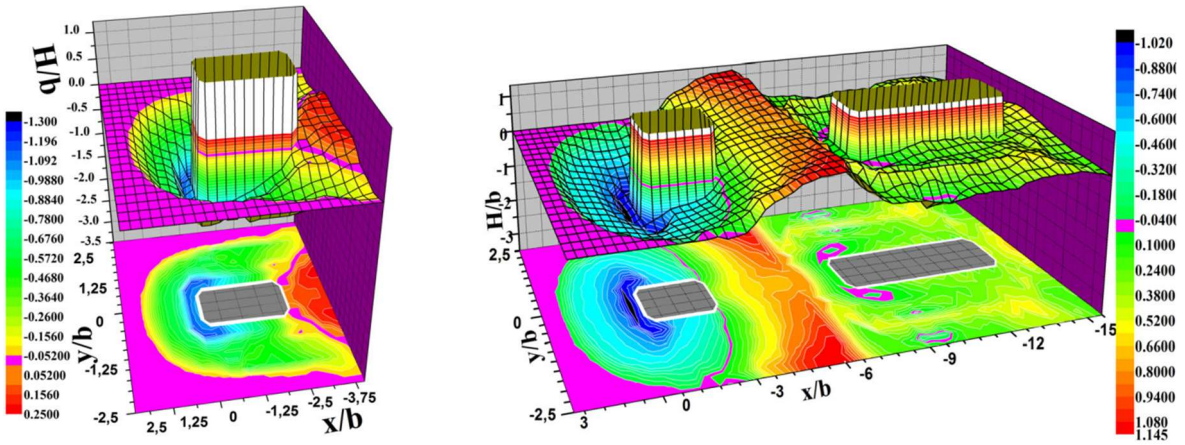


Рисунок 4 – Аксонометрія особливостей формування розмиву та намиву ґрунту у випадку поодинокого розташування призматичної опори (а) та взаємного розташування опор двох мостових переходів (б) на плоскому піщаному дні гідродинамічного лотка

Figure 4 – Axonometry of the features of the formation of erosion and soil washing in the case of a single location of a prismatic support (a) and mutual location of the supports of two bridge crossings (b) on a flat sandy bottom of a hydrodynamic trough

Аксонометрія формування розмиву ґрунту та намиву піску позаду мостових опор в результаті вимірювання профілю ґрунту під час обтікання моделей мостових переходів як в поодинокій конструкції, так і у випадку одночасного розташування опор двох мостових переходів приведена на рис. 4.

Результати вимірювань та оцінок під час візуальних та інструментальних досліджень показали, що взаємне розташування призматичних опор першого за потоком мостового переходу та трирядних циліндричних опор у вигляді ростверку другого мостового переходу суттєво впливають на форму та розміри отворів розмиву та намиву піщаного ґрунту на плоскій поверхні піщаного дна гідродинамічного лотка.

Висновки. Установлено, що за взаємного розташування моделей двох мостових переходів, що знаходяться у сліді один за одним, локальний розмив ґрунту перед призматичною опорою переднього за потоком мостового переходу збільшилася майже на 15% за надкритичними швидкостями течії на мілкій воді і зменшилася майже на 20% за докритичними швидкостями на глибокій воді.

Визначено, що характер і механізм формування розмиву ґрунту перед призматичною опорою не змінювалися внаслідок взаємного розташування опор мостових переходів в сліді одне за одним, а саме профілі розмиву мали дві характерні ділянки з різними кутами нахилу фронтальної поверхні заглиблення, які обумовлені формуванням двох систем квазістійких великомасштабних підковоподібних вихрових структур. Так, вихрова структура, яка розташована ближче до обтічної опори і знаходиться глибше, має менший масштаб і утворює менший за розмірами розмив.

Показано, що між двома заглибленнями, що формуються підковоподібними структурами, у профілі розмиву спостерігалися намивання піску. Встановлено, що ширина отвору розмиву ґрунту більш ніж у 2 рази більша за глибину розмиву і максимальна глибина спостерігається перед призматичною опорою на віддаленні близько чверті ширини опори.

Перелік посилань

1. Puspasari A.D., Haw-Tang J. A review on the numerical simulation model of scouring around bridge pier by using Flow-3D software. J. Civil Engineering, Planning, and Design. 2024.3(2).P. 78-92.
2. Prendergast L.J., Gavin K. A review of bridge scour monitoring techniques. J. Rock Mech. Geotechn. Eng. 2014. 6 P. 138-149. http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.007
3. Jamel A.A.J., Ali M.I. Comparing scour characteristics around different bridge piers - A review. Samarra j. Eng. Sci. Research. 2024. 2(1). P. 28-44.
4. Beg M., Beg S. Scour reduction around bridge piers: A review. Intern. J. Eng. Inventions. 2013. 2(7). P. 7-15.
5. Dong H., Li Z, Sun Z. Study on the mechanism of local scour around bridge piers. J. Mar. Sci. Eng. 2025. 13. P. 1021. https://doi.org/10.3390/jmse13061021
6. Chen Q., Huang R., Zhang H., Zhong Q. An energy conservation model for the temporal evolution of local scour depth at bridge piers during floods. Intern. J. Sediment Res. 2024.39. P. 654-669. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.001
7. Ettema R., Kirkil G., Muste V. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. J. Hydr. Eng. 2006. 132(1). P. 33–40.
8. Xiong W., Cai C.S., Zhang R., Shi H., Xu C. Review of hydraulic bridge failures: Historical statistical analysis, failure modes, and prediction methods. J. Bridge Eng. 2023. 28(4). P. 03123001.
9. Voskobijnyk A.V., Voskoboinick V.A., Voskoboinyk O.A., Tereshchenko L.M., Khizha I.A. Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row pile group // Abstracts 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) (12-15 September 2016). Oxford, UK, 2016. P. 176. https://doi.org/10.1201/9781315375045-114
10. Ikani N., Pu J.H., Soori S. Flow pattern and turbulent kinetic energy analysis around tandem piers: Insights from k-ε modelling and Acoustic Doppler Velocimetry measurements. Water. 2025. 17. P. 1100. https://doi.org/10.3390/w17071100
11. Voskoboinick V.A., Gorban I.M., Voskoboinick A.A., Tereshchenko L.N., Voskoboinick A.V. Junction flow around cylinder group on flat plate. In: Sadovnichiy V.A., Zgurovsky
12. Misuriya G., Eldho T.I. Turbulent structures and local scour around a cylindrical pier under unsteady flows. Environmental Fluid Mechanics. 2023. 23. P. 1359-1380. https://doi.org/10.1007/s10652-023-09951-z
13. Gorban I. Application of the model of trapped vortices to the control of flow around a bridge pier. J. Physics: Confer. Series. 2024. 2899. P. 012015. http://dx.doi.org/10.1088/1742- 6596/1/012015

14. Bauri K.P., Sarkar A., Nones M. Three-dimensional bursting process and turbulent coherent structure within scour holes at various development stages around a cylindrical structure. J. Fluid Mech. 2024. 997. P. A61. https://doi.org/10.1017/jfm.2024.642

15. Krajnovic S. Flow around a tall finite cylinder explored by large eddy simulation J. Fluid Mech. 2011. 676. P. 294-317.

16. Kirkil G., Constantinescu G. A numerical study of the laminar necklace vortex system and its effect on the wake for a circular cylinder. Phys. Fluids. 2012. 24(7). P. 073602-1-26.

17. Escauriaza C., Sotiropoulos F. Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows. J. Fluid Mech. 2011. 666. P. 36-76.

18. Kirkil G., Constantinescu G., Ettema R. Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole. J. Hydraulic Eng. 2008. 134 (5). P. 572-587.

19. Radice A., Tran C.K. Study of sediment motion in scour hole of a circular pier. J. Hydraulic Res. 2012. 50(1). P. 44-51.

20. Das S., Das R., Mazumdar A. Comparison of characteristics of horseshoe vortex at circular and square piers. Res. J. Applied Sci., Eng. Technology. 2013. 17(5). P. 4373-4387.

21. Воскобійник А.В., Воскобійник В.А., Воскобойник О.А. Просторово часові кореляції та спектри пульсацій швидкості спряженої течії поблизу трирядного ансамблю циліндрів. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2009. Вип. 12. С. 165-177.

22. Voskoboinick A., Voskoboinick V., Turick V., Voskoboinyk O., Cherny D., Tereshchenko L. Interaction of group of bridge piers on scour. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He

23. Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.V., Areshkovych O.O., Voskoboinyk O.A. Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) (12-15 September 2016). Oxford, UK, 2016. P. 905-910. https://doi.org/10.1201/9781315375045-115

24. Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.A., Turick V.N., Voskoboinick A.V. Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices. J. Eng. Physics Thermophysics. 2020. 93(5). P. 1205-1220. https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3

SOIL ERASING DURING GROUP PLACEMENT OF BRIDGE SUPPORTS

Volodymyr Voskoboinick, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: vlad.vsk@gmail.com http://orcid.org/0000-0003-2161-6923

Artur Onyshchenko, Doctor of Technical Science, Professor, Head of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, National Transportation University Kyiv, Ukraine, e-mail: *onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, +380687771899, https://orcid.org/0000-0002-1040-4530* .

Sergii Aksonov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, Aksenov121@gmail.com, tel. +380971534406, https://orcid.org/0000-0002-6749-3909.

Nataliia Chyzhenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures Department National Transportation University Kyiv, Ukraine, e-mail: *chyzhenko_np@ukr.net, +380507355080,* https://orcid.org/ 0000-0002-9152 2474.

Serhii Voroshnov, Candidate of Technical Sciences, Ph. D, National Transportation University, Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, e-mail: *voroshnov52@ukr.net, +38067709707,* https://orcid.org/0000-0003-0642-8289

Denys Trudenko, Postgraduate student of the department of bridges, tunnels and hydraulic structures. National Transport University, Kyiv, Ukraine, *e-mail:* tdv.83@ukr.net *http://orcid.org/0009-0001-3720-1952*

Summary. Introduction. Scour is one of the causes of the destruction of hydraulic structures, which is formed under the action of junction flow near bluff bodies, which occurs during the construction and operation of bridge crossings over water obstacles, during the installation of drilling supports and foundations of wind power plants in the shelf zone, and the construction of mooring structures on the ground. In this regard, a significant number of experimental and theoretical studies aimed at studying the phenomenon of local scour and developing means and methods for its reduction, which is extremely relevant.

Problem Statement. The process of formation of scour holes near bluff bodies installed on erosive soil is due to the formation and further development of a system of horseshoe vortex structures and wake vortices that are formed around the streamlined structure near its connection with the bottom. The main mechanism responsible for the formation and development of the scour hole includes a flow directed to the bottom in the front or frontal part of the pier, together with the formation of a system of horseshoe vortex structures near the base of the pier and wake vortices that break away from the pier surface.

Purpose. The purpose of the work is to determine the features of scour during the group arrangement of bridge piers using laboratory experimental researches.

Materials and methods. Experimental researches of the features of scour formation during the group arrangement of piers of two bridge crossings, which were in the wake of each other, were carried out on models of piers in laboratory conditions in a hydrodynamic channel using visual and instrumental research methods. Hydrodynamic characteristics of vortex and jet flows were obtained using specially designed and manufactured velocity and pressure sensors, and the parameters and shape of scour holes were determined using scour depth sensors.

Results. Experimental researches allowed to determine the features of scour formation around the group structure of bridge piers. Profiles of local scour in front of the frontal part of the prismatic pier were obtained depending on the junction flow velocity, flow depth and Froude numbers for the single arrangement of the piers of the upper streamlined bridge crossing and the joint arrangement of the piers of two bridge crossings. The features of the formation of scour and alluvium near bridge crossing piers in an axonometric representation are presented.

Conclusions. As a result of the research, it was established that the mutual arrangement of the models of the piers of two bridge crossings leads to significant changes in the scour in front of the prismatic piers of the first streamlined bridge crossing. Thus, the local scour increased by 15% at supercritical flow velocities in shallow water and decreased by almost 20% at subcritical velocities in deep water. It is shown that the scour profiles have two characteristic sections with different angles of inclination of the front surface of the scour hole, which are due to the formation of two systems of quasi-stable large-scale horseshoe vortex structures.

Keywords: local scour, prismatic pier, three-row grillage, horseshoe vortex, scour profile, bridge crossing

References

1. Puspasari A.D., Haw-Tang J. A review on the numerical simulation model of scouring around bridge pier by using Flow-3D software. J. Civil Engineering, Planning, and Design. 2024.3(2).P. 78-92.
2. Prendergast L.J., Gavin K. A review of bridge scour monitoring techniques. J. Rock Mech. Geotechn. Eng. 2014. 6 P. 138-149. http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.007
3. Jamel A.A.J., Ali M.I. Comparing scour characteristics around different bridge piers - A review. Samarra j. Eng. Sci. Research. 2024. 2(1). P. 28-44.
4. Beg M., Beg S. Scour reduction around bridge piers: A review. Intern. J. Eng. Inventions. 2013. 2(7). P. 7-15.
5. Dong H., Li Z, Sun Z. Study on the mechanism of local scour around bridge piers. J. Mar. Sci. Eng. 2025. 13. P. 1021. https://doi.org/10.3390/jmse13061021
6. Chen Q., Huang R., Zhang H., Zhong Q. An energy conservation model for the temporal evolution of local scour depth at bridge piers during floods. Intern. J. Sediment Res. 2024.39. P. 654-669. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.001

7. Ettema R., Kirkil G., Muste V. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. J. Hydr. Eng. 2006. 132(1). P. 33–40.

8. Xiong W., Cai C.S., Zhang R., Shi H., Xu C. Review of hydraulic bridge failures: Historical statistical analysis, failure modes, and prediction methods. J. Bridge Eng. 2023. 28(4). P. 03123001.

9. Voskobijnyk A.V., Voskoboinick V.A., Voskoboinyk O.A., Tereshchenko L.M., Khizha I.A. Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row pile group // Abstracts 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) (12-15 September 2016). Oxford, UK, 2016. P. 176. https://doi.org/10.1201/9781315375045-114

10. Ikani N., Pu J.H., Soori S. Flow pattern and turbulent kinetic energy analysis around tandem piers: Insights from k-ε modelling and Acoustic Doppler Velocimetry measurements. Water. 2025. 17. P. 1100. https://doi.org/10.3390/w17071100

11. Voskoboinick V.A., Gorban I.M., Voskoboinick A.A., Tereshchenko L.N., Voskoboinick A.V. Junction flow around cylinder group on flat plate. In: Sadovnichiy V.A., Zgurovsky

12. Misuriya G., Eldho T.I. Turbulent structures and local scour around a cylindrical pier under unsteady flows. Environmental Fluid Mechanics. 2023. 23. P. 1359-1380. https://doi.org/10.1007/s10652-023-09951-z

13. Gorban I. Application of the model of trapped vortices to the control of flow around a bridge pier. J. Physics: Confer. Series. 2024. 2899. P. 012015. http://dx.doi.org/10.1088/1742- 6596/1/012015

14. Bauri K.P., Sarkar A., Nones M. Three-dimensional bursting process and turbulent coherent structure within scour holes at various development stages around a cylindrical structure. J. Fluid Mech. 2024. 997. P. A61. https://doi.org/10.1017/jfm.2024.642

15. Krajnovic S. Flow around a tall finite cylinder explored by large eddy simulation J. Fluid Mech. 2011. 676. P. 294-317.

16. Kirkil G., Constantinescu G. A numerical study of the laminar necklace vortex system and its effect on the wake for a circular cylinder. Phys. Fluids. 2012. 24(7). P. 073602-1-26.

17. Escauriaza C., Sotiropoulos F. Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows. J. Fluid Mech. 2011. 666. P. 36-76.

18. Kirkil G., Constantinescu G., Ettema R. Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole. J. Hydraulic Eng. 2008. 134 (5). P. 572-587.

19. Radice A., Tran C.K. Study of sediment motion in scour hole of a circular pier. J. Hydraulic Res. 2012. 50(1). P. 44-51.

20. Das S., Das R., Mazumdar A. Comparison of characteristics of horseshoe vortex at circular and square piers. Res. J. Applied Sci., Eng. Technology. 2013. 17(5). P. 4373-4387.

21. Воскобійник А.В., Воскобійник В.А., Воскобойник О.А. Просторово часові кореляції та спектри пульсацій швидкості спряженої течії поблизу трирядного ансамблю циліндрів. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2009. Вип. 12. С. 165-177.

22. Voskoboinick A., Voskoboinick V., Turick V., Voskoboinyk O., Cherny D., Tereshchenko L. Interaction of group of bridge piers on scour. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He

23. Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.V., Areshkovych O.O., Voskoboinyk O.A. Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) (12-15 September 2016). Oxford, UK, 2016. P. 905-910. https://doi.org/10.1201/9781315375045-115

24. Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.A., Turick V.N., Voskoboinick A.V. Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices. J. Eng. Physics Thermophysics. 2020. 93(5). P. 1205-1220. https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3

УДК 624.21
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-297-311

ДОСВІД ПРОВЕДЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ВИПРОБУВАНЬ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ У РАМКАХ МОДАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ

EXPERIENCE OF IMPULSE TESTING OF HIGHWAY BRIDGES WITHIN THE FRAMEWORK OF MODAL CONTROL



Онищенко Артур Миколайович, *доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна,*
e- mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com

https://orcid.org/0000-0002-1040-4530



Каськів Володимир Іванович, *кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи, державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна,*
e- mail: vk@nidi.org.ua

https://orcid.org/0000-0002-8074-6798



Редченко Василь Павлович, *доктор технічних наук, директор ПСП «Мост-сервіс», м. Дніпро, Україна, e-mail: rvp50@meta.ua*

https://orcid.org/ 0000-0001-5938-1467



Завгородній Сергій Сергйович *начальник Центру мостів та будівельних конструкцій, державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна*
e-mail: serhiy.zavhorodniy@gmail.com

https://orcid.org/0000-0003-1928-4544

Анотація: У статті представлено результати досліджень, спрямованих на оцінку технічного стану автодорожніх мостів методом імпульсних випробувань у рамках модального контролю. Розглянуто теоретичні засади та практичні аспекти застосування імпульсного навантаження, що створюється шляхом короткочасного динамічного впливу на прогонову будову. Наведено приклад

натурних випробувань великої мостової споруди, під час яких збудження вільних коливань здійснювали скиданням вантажу на проїзну частину. Вимірювання коливальної реакції проводили за допомогою сейсмоприймачів, а оброблення сигналів виконували у програмному комплексі спектрального аналізу.

Отримані результати дозволили визначити власні частоти, декременти та ординати форм коливань, а також здійснити порівняння з розрахунковими моделями, побудованими методом скінченних елементів. Зафіксоване зниження власних частот порівняно з попередніми випробуваннями свідчить про зменшення інтегральної жорсткості прогонової будови. Відповідно до положень ДСТУ 9181:2022 «Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [1] технічний стан споруди попередньо був оцінений як 4 – «обмежено працездатний».

Результати підтверджують доцільність та актуальність використання імпульсних випробувань для оперативного отримання динамічних характеристик мостів, виявлення тенденцій зниження жорсткості та уточнення оцінки технічного стану конструкцій.

Ключові слова: автомобільна дорога, власні форми коливань, дефект, динамічне випробування, жорсткість, міст, модальне контролювання, параметр, прогонова будова, технічний стан.

Вступ. Мережа автомобільних доріг це одна із основних ланок критичної інфраструктури України, що забезпечує безперервність та мобільність транспортування, зокрема вантажів для оборонних і гуманітарних потреб. Мости, як невід'ємна складова автомобільних доріг, є тими елементами, аварійна ситуація на яких напряму впливає на пропускну здатність дороги або зупинку транспортного сполучення. Тому є досить актуальною і важливою задача виявлення прихованих пошкоджень відповідальних елементів моста, зокрема прогонової будови, з метою запобігання аварій і прийняття рішень щодо ремонту, реконструкції споруди або введення певних тимчасових обмежень під час її експлуатації. Ці рішення, особливо в умовах обмеженого фінансування, повинні базуватись на ґрунтовних, інформативних і, у той же час відносно не складних і затратних, методах дослідження реальних умов роботи елементів моста.

Базовою процедурою оцінки технічного стану елементів моста є обстеження, орієнтоване на виявлення дефектів та їхній вплив на роботу споруди. Однак, у певних випадках, даних візуальних та інструментальних обстежень недостатньо для достовірного визначення технічного стану та залишкового ресурсу моста. У таких ситуаціях виправданим є залучення такого інструмента як динамічні випробування, які дозволяють провести аналіз реакції конструкції на експлуатаційне навантаження, дослідити власні частоти та форми коливань, оцінити жорсткість конструкції та виявити приховані пошкодження. Порівняно зі статичними випробуваннями, динамічні методи випробувань зазвичай потребують менших витрат часу та ресурсів при достатній інформативності результатів.

Динамічні випробування – випробування конструкції під дією сил, що спричиняють прискорений відносний рух її точок, тобто викликають коливальну реакцію елементів. У рамках динамічних випробувань використовують схожі, проте різні за змістом поняття «вібраційні випробування» та «вібраційна діагностика». Вібраційні випробування — кероване, регламентоване збудження об'єкта із подальшою реєстрацією відповіді. Вібраційна діагностика — встановлення технічного стану шляхом аналізу параметрів вібрації об'єкта діагностування. До другої групи належить модальний контроль, який базується на визначенні та аналізі модальних параметрів конструкції (власні частоти, форми коливань, демпфування) та використовується для моніторингу технічного стану,

оцінювання структурних параметрів (маса, жорсткість), виявлення та локалізації дефектів, а також для ідентифікації розрахункової моделі споруди як динамічної системи. Важливо коректно використовувати терміни «коливання» — родове поняття, що описує зміну в часі будь-якої величини та «вібрація» — лише рух фізичних тіл.

Серед підходів модального контролю перспективним є збудження вільних коливань імпульсним навантаженням. Принцип полягає у короткочасному енергетичному впливі на конструкцію з подальшою реєстрацією затухаючої відповіді, що дає змогу коректно виділяти власні частоти, декременти та за їх змінами оцінювати зміни жорсткості конструкцій. Теоретичні засади методу докладно висвітлені у наукових роботах [2–5] і лягли в основу положень національного стандарту [6], а також висвітлені у роботах авторів [7, 8]. Причому питанню використання вібраційних випробувань і вібраційної діагностики, і не тільки мостових споруд, приділено багато уваги і в зарубіжних виданнях, зокрема у [9] відмічено, що динамічне випробування існуючих мостів є досить перспективним рішенням для оцінки технічного стану споруди, оскільки воно є більш зручним, ніж статичні випробування, які вимагають організації вантажівок і перекриття руху через міст, у деяких випадках на тривалий час. Однак його ефективність залежить від техніки випробування, кількості, типу та розташування датчиків, а також від числової моделі, яка повинна дозволяти введення реальних граничних умов. Вібраційним дослідженням фундаментів мостів присвячена робота [10], а у [11] представлено результати вібраційних досліджень, проведених з метою оцінки стану конструкції 74 метрової цегляної дзвіниці. Масштабне експериментальне динамічне дослідження було виконане під час етапів будівництва моста з ізольованою основою через річку Потенца в центральній Італії [12]. Крім динамічних були виконані також статичні випробування під час приймання моста в експлуатацію. Порівняння результатів випробувань з числовими розрахунковими значеннями допомогло оцінити узгодженість між проєктом і реальною конструкцією на різних етапах будівництва.

Проте, застосування методу динамічного випробування на реальних спорудах ще опрацьовується, оскільки необхідна інженерна регламентація, що стосується безпечного формування імпульсу, вибору місць прикладання та трас розташування датчиків, коректної математичної моделі тощо.

Виклад основного матеріалу. Імпульсний метод випробувань мостів полягає у збудженні вільних коливань прогонової будови за рахунок короткочасного енергетичного впливу. Такий вплив може бути реалізований різними способами, зокрема шляхом скидання на проїзну частину мосту вантажу відносно невеликої маси, використанням ударної установки типу копра або застосуванням маятникових і таранних пристроїв, що створюють горизонтальний імпульс. Порівняно зі статичними випробуваннями, де вплив має тривалий характер, імпульсна дія є короткочасною, але дозволяє отримати інформативну реакцію конструкції у вигляді затухаючих коливань. Саме ці коливання несуть ключову інформацію про динамічні властивості споруди.

Відповідно до ДСТУ 8748 [6] і МР В.2.3-37641918-944 [13] імпульсне навантаження вважається доцільним інструментом для модального контролю, оскільки воно забезпечує отримання власних частот, ординат форм коливань і дозволяє оцінити зміни жорсткості у часі. При цьому реальний імпульс не є миттєвим, оскільки сила, що передається конструкції, зростає до максимуму і поступово спадає до нуля. Ефект дії наближається до ідеального імпульсу лише тоді, коли тривалість передачі енергії є значно меншою за період коливань. У протилежному випадку ефективність збудження

знижується, а додаткові чинники, такі як відскок вантажу чи повторні удари, можуть зменшувати початкову амплітуду.

Для пояснення сутності методу доцільним є порівняння з відтяжкою тієї ж маси. Якщо маса m створює відтяжку під дією сили $P = mg$, то початкову амплітуду вільних коливань визначають як:

$$A_{\text{в}} = A_1 \cdot mg, \tag{1}$$

де A_1 – коефіцієнт пропорційності, що залежить від характеристик споруди.

У випадку ж скидання цієї маси з висоти h імпульс дорівнює:

$$p = m\sqrt{2gh}, \tag{2}$$

а амплітуда коливань виражається рівнянням:

$$A_i = A_1 \cdot W \cdot m\sqrt{2gh}. \tag{3}$$

Відношення між цими амплітудами визначається співвідношенням:

$$\frac{A_i}{A_{\text{в}}} \approx 2{,}83F \cdot \sqrt{h},$$

де F – власна частота коливань конструкції (Гц), $W = 2\,\pi\,F$;
h – висота падіння вантажу (м).

Розрахунки показують, що для споруди з першою власною частотою 5 Гц падіння маси з висоти 1 м викликає амплітуди коливань приблизно у десять разів більші, ніж від тієї ж маси у режимі відтяжки. Якщо за руху автомобіля масою 10 т динамічна добавка становить 10 %, то у прикладному вимірі це означає, що вантаж 100 кг здатен створити коливання, еквівалентні за амплітудою діям автомобіля масою близько 10 т. Таким чином, для організації ефективного випробування не обов’язково залучати важкий транспорт, що суттєво спрощує процес.

Акселерограми, отримані у практичних дослідженнях, підтверджують цю закономірність. Вільні коливання, збуджені скиданням вантажу, демонструють амплітуди, що перевищують реакцію від проїзду вантажівки подібної маси. Це вказує на високу ефективність імпульсного методу для збудження коливань прогонових будов мостів.

Імпульсні випробування є технічно нескладним у реалізації та економічно доцільним методом оцінювання динамічних характеристик мостових споруд. Вони забезпечують можливість своєчасного виявлення зниження жорсткості та локалізації дефектів, слугують засобом перевіряння розрахункових моделей і можуть застосовуватись як самостійно, так і в комплексі з іншими видами обстежень.

Для реалізації імпульсних випробувань було використане спеціальне обладнання, призначене для скидання на проїзну частину прогонової будови моста вантажу масою 100 кг. Конструкція та параметри вантажу підібрані з урахуванням вимог щодо збереження цілісності дорожнього покриття

та відсутності відскоку після падіння. Висота скидання обмежується до 1,0 м, що є достатнім для збудження вільних коливань більшості прогонових будов автодорожніх мостів без ризику пошкодження проїзної частини.

На рис. 1 наведено принципову схему установки з ручною лебідкою. Вона складається з рами, лебідки, троса, крюка з поворотною частиною та пускового тросика. Рама виконана у вигляді триноги, де одна нога подовжена і на ній змонтована лебідка. У розгорнутому положенні стійкість конструкції забезпечується трьома в'язями. Для зручності переміщення дві опори рами можуть оснащуватися колесами, як на натурному прикладі на рис. 2.

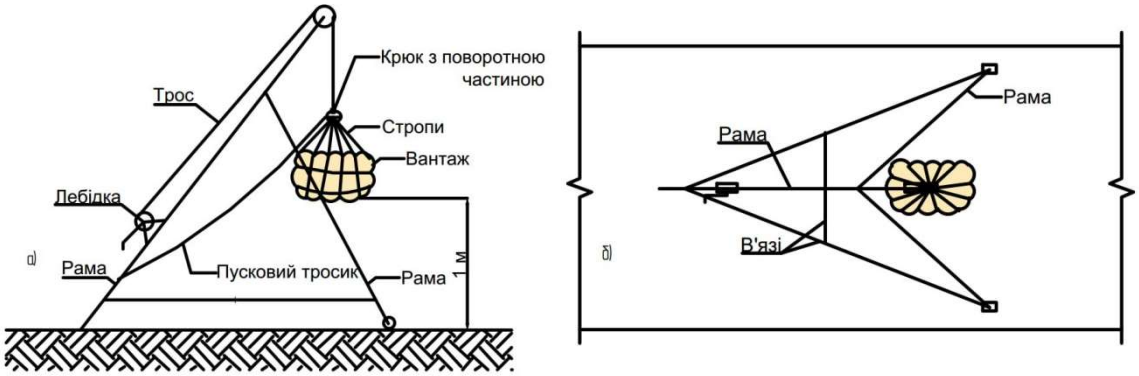


Рисунок 1 – Принципова схема устаткування для скидання вантажу: а) вид збоку, б) вид згори
Figure 1 – Principal scheme of the device for load dropping: a) side view, b) top view



Рисунок 2 – Лебідка для скидання вантажу
Figure 2 – Load-dropping device

Ручна лебідка обладнана стопорним механізмом, що дозволяє піднімати вантаж і фіксувати його на заданій висоті. Підвішування здійснюється через стропи, закріплені на поворотному крюку.

При натягуванні пускового тросика крюк повертається та звільняє вантаж. Сам вантаж являє собою циліндричний мішок діаметром і висотою близько 0,6 м, виготовлений із міцної тканини. Конструкція підсилена капроновими смугами, що охоплюють корпус мішка і з'єднані сталевим кільцем для підвішування. Дно укріплене гумовою прокладкою товщиною не менше ніж 5 мм. Вантаж формується з десяти окремих мішечків з піском масою по 10 кг, які укладаються у загальний мішок і стягуються зав'язками.

Порядок виконання робіт:

1) вантаж встановлюють у точці прикладання навантаження;
2) над цією точкою монтують раму з лебідкою;
3) вантаж підвішують до крюка та піднімають на задану висоту;
4) скидання здійснюють натягом пускового тросика;
5) після падіння трос відпускають і процедура повторюється з пункту 3.

Наглядним прикладом успішного застосування імпульсного методу може слугувати проведене у 2023 році випробування одного з великих автодорожніх мостів у рамках планового обстеження (рис. 3). Прогонова будова цієї споруди виконана у вигляді нерозрізної коробчастої балки постійної висоти, зібраної зі збірних залізобетонних блоків, обтиснених пучками напруженої арматури. Конструктивна схема включає десять прогонів із розмірами 33 + 8 × 42 + 33 м.



Рисунок 3 – Фасад досліджуваної споруди
Figure 3 – Front view of the tested structure

Динамічні випробування здійснювали відповідно до ДСТУ 8748 [6]. Для збудження вільних коливань було використано імпульсне навантаження, яке створювали скиданням мішка з піском масою близько 100 кг на проїзну частину. Імпульс прикладали у центральній частині споруди за відсутності транспортного руху, що дозволяло отримати «чисту» реакцію конструкції без сторонніх впливів.

Вимірювання виконували за допомогою двох сейсмоприймачів ОСП-2МВ (рис. 4), один з яких був встановлений як реперний, а інший послідовно переміщували між різними прогонами. Аналогові сигнали підсилювали у 2 000 разів і синхронно реєстрували у пам'яті комп'ютера з частотою дискретизації 100 Гц. Контрольні точки для фіксації коливань розташовували у серединах прогонів на відстані близько 1 м від краю проїзної частини. Під час роботи було проведено понад 30 окремих експериментів, що забезпечило необхідний обсяг даних для подальшого спектрального аналізу та визначення модальних параметрів.



Рисунок 4 – Сейсмоприймачі ОСП-2МВ на проїзній частині у прогонах 5-6 та 6-7
Figure 4 – Seismometers OSP-2MV placed on the roadway in spans 5–6 and 6–7

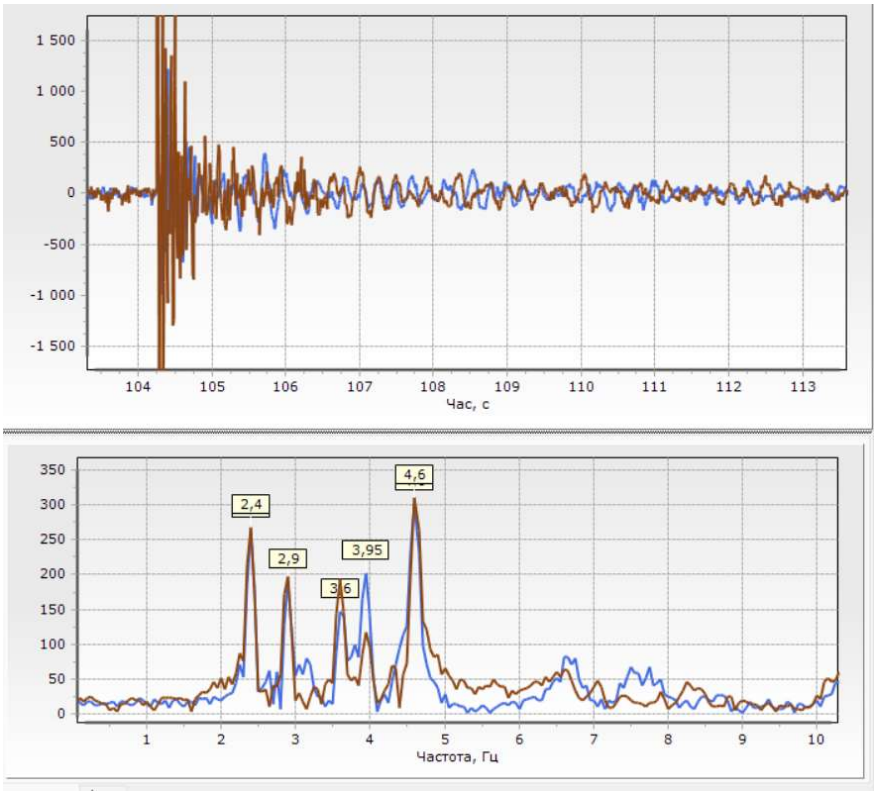


Рисунок 5 – Синхронні графіки вертикальних коливань прогонової будови у серединах прогонів 5-6 та 6-7 при імпульсному навантаженні в прогоні 4-5. Внизу графіки амплітудних спектрів
Figure 5 – Synchronous graphs of vertical vibrations of the span structure at the midpoints of spans 5–6 and 6–7 under impulse loading in span 4–5. Amplitude spectra are shown below

Зразок синхронно зареєстрованих акселерограм у двох суміжних прогонах наведено на рис. 5. У верхній частині графіків показані часові залежності прискорень, а в нижній – спектри амплітудного розкладу, що дозволили виділити найбільш виражені власні частоти конструкції.

Опрацювання даних було виконане у програмному комплексі «СпектрУМ». За результатами аналізу було визначено вісім перших власних форм коливань у вертикальній площині. Частоти знаходилися в діапазоні від 2,4 Гц до 4,6 Гц, а декременти коливань становили від 0,04 до 0,06 (табл. 1). Такі значення відповідають нормальним показникам для споруд даного типу та підтверджують чутливість методу імпульсного навантаження до визначення динамічних характеристик.

Таблиця 1 – Частоти та декременти власних форм коливань у вертикальній площині за результатами натурних випробувань

Table 1 – Frequencies and decrements of natural vibration modes in the vertical plane based on field test results

Номер власної форми	Частота, Гц	Декремент коливань
1	2,400	0,04
2	2,577	0,05
3	2,888	0,04
4	3,216	0,05
5	3,598	0,04
6	3,963	0,04
7	4,326	0,04
8	4,612	0,06

Подальший аналіз включав визначення нормалізованих ординат власних форм. Для цього використовували дані кількох експериментів у різних точках прогонової будови. Найбільш показовими виявилися 1-а, 3-я та 8-а форми, оскільки саме вони мали найбільш виражені амплітуди під час прикладання імпульсу в одному із центральних прогонів. Отримані значення узагальнені у табл. 2 і дозволяють оцінити розподіл нормалізованих ординат власних форм уздовж конструкції.

Аналіз прогонової будови як динамічної системи виконували шляхом зіставлення натурних результатів із розрахунковими даними. Із цією метою у програмному комплексі методу скінченних елементів були побудовані дві моделі, а саме стрижнева та плитна (рис. 6). Перша відтворювала конструкцію у вигляді балки з постійними параметрами маси та жорсткості по довжині й застосовувалася для визначення інтегральних характеристик. Друга — просторову роботу системи, змодельовану плитними елементами, що дозволило уточнити модальні параметри з урахуванням реальної геометрії.

Таблиця 2 – Нормалізовані ординати власних форм коливань за результатами натурних випробувань
Table 2 – Normalized ordinates of natural vibration modes based on field test results

Прогонова будова	Нормалізовані ординати		
	1-а форма	3-я форма	8-а форма
0-1	-0,2607	0,3816	-0,5303
1-2	0,7491	-1,3514	0,0732
2-3	-1,1037	0,9326	0,4845
3-4	1,2297	0,4747	0,9181
4-5	-1,1559	-1,4743	1,0596
5-6	1,0000	1,0000	1,0000
6-7	-1,1539	-1,3647	1,0171
7-8	0,5869	-1,3202	0,6453
8-9	-0,3646	1,2179	0,2029

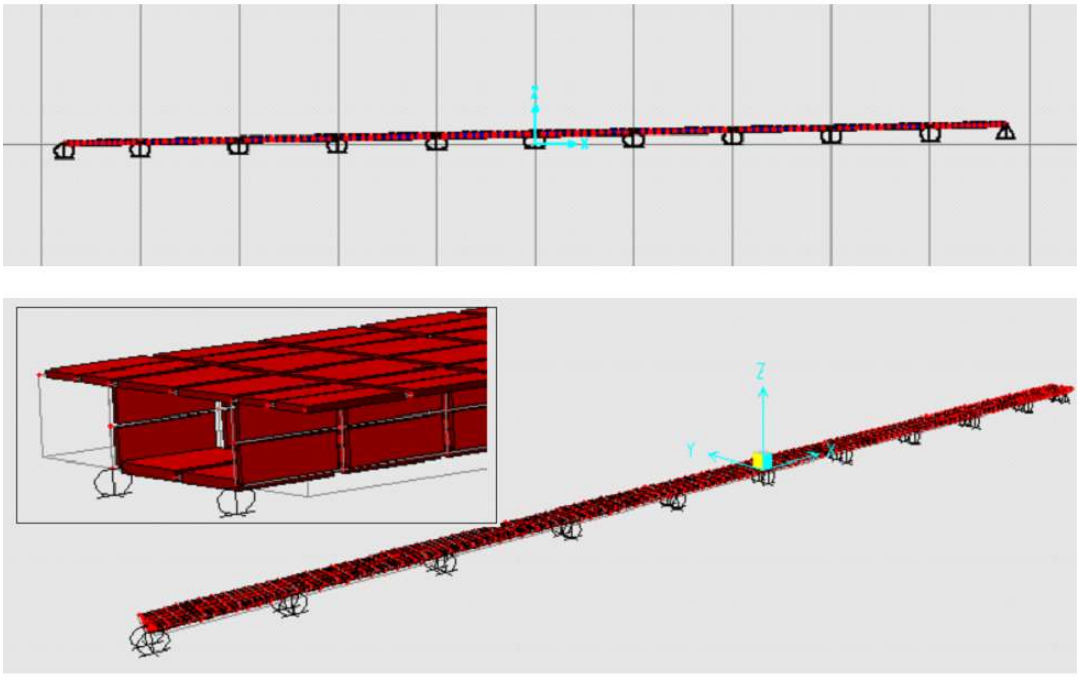


Рисунок 6 – Загальні зображення розрахункових моделей прогонової будови: із стрижневих елементів та з плитних елементів
Figure 6 – General views of the computational models of the span structure: frame-element model and plate-element model

Під час аналізування було розглянуто вісім перших власних форм у вертикальній площині, оскільки вищі форми практично не збуджувалися при прикладанні імпульсу в центральних прогонах. Порівняльні дані наведено у табл. 3. Встановлено, що частоти, отримані під час випробувань у 2003 та 2009 роках, залишалися практично незмінними, що свідчить про стабільний технічний стан у цей період. Натомість результати 2023 року зафіксували зниження власних частот у середньому на 3 %. При цьому відносне співвідношення між формами збереглися, що вказує на відсутність одиничного локального дефекту та підтверджує зміну характеристик конструкції на значній її протяжності.

Причинами такого зниження можуть бути або збільшення маси прогонової будови (наприклад, унаслідок заміни чи посилення дорожнього одягу), або зменшення жорсткості через утворення поширених дефектів. За результатами обстеження конструкція дорожнього одягу, а, отже, і маса прогонової будови не змінилася. Відповідно, найімовірнішим поясненням є поява регулярних тріщин у залізобетонних елементах під дією великовагового транспорту. Відповідно до критеріїв, визначених у ДСТУ 9181 [1], таке зниження власних частот дає підстави попередньо віднести технічний стан до категорії «обмежено працездатний». Остаточну оцінку потрібно уточнити за результатами детальних обстежень.

Таблиця 3 – Порівняння значень частот власних коливань за розрахунками та фактичних у різні роки випробувань

Table 3 – Comparison of natural vibration frequencies from calculations and field tests in different years

	№ форми	1	2	3	4	5	6	7	8
Балкова модель	Частота, Гц	**2,40**	**2,56**	**2,80**	**3,09**	**3,41**	**3,74**	**4,04**	**4,28**
	Відносно 1-ї	1,00	1,07	1,17	1,29	1,42	1,56	1,68	1,78
Плитна модель	Частота, Гц	**2,40**	**2,58**	**2,86**	**3,21**	**3,60**	**4,02**	**4,43**	**4,79**
	Відносно 1-ї	1,00	1,08	1,19	1,34	1,50	1,67	1,85	1,99
Натурні 2003 рік	Частота, Гц	**2,49**	**2,67**	**2,98**	**3,33**	**3,71**	**4,09**	**4,46**	**4,73**
	Відносно 1-ї	1,00	1,07	1,20	1,34	1,49	1,64	1,79	1,90
Натурні 2009 рік	Частота, Гц	**2,49**	**2,70**		**3,35**	**3,70**	**4,10**		
	Відносно 1-ї	1,00	1,08		1,35	1,49	1,65		
Натурні 2023 рік	Частота, Гц	**2,40**	**2,58**	**2,89**	**3,22**	**3,60**	**3,96**	**4,33**	**4,61**
	Відносно 1-ї	1,00	1,07	1,20	1,34	1,50	1,65	1,80	1,92
Зменшення частоти, (2023 рік / 2003 рік)		**0,96**	**0,97**	**0,97**	**0,97**	**0,97**	**0,97**	**0,97**	**0,98**

Додаткову інформацію для оцінювання отримали із графіків нормалізованих ординат власних форм (рис. 7). Порівняння натурних і розрахункових даних засвідчило, що в лівобережній частині споруди інтегральна жорсткість нижча порівняно з правобережною. Різниця оцінюється у межах 10 % при рівномірному розподілі по довжині або до 20 % на окремих ділянках, де було виконане підсилення стінок коробчастих елементів.

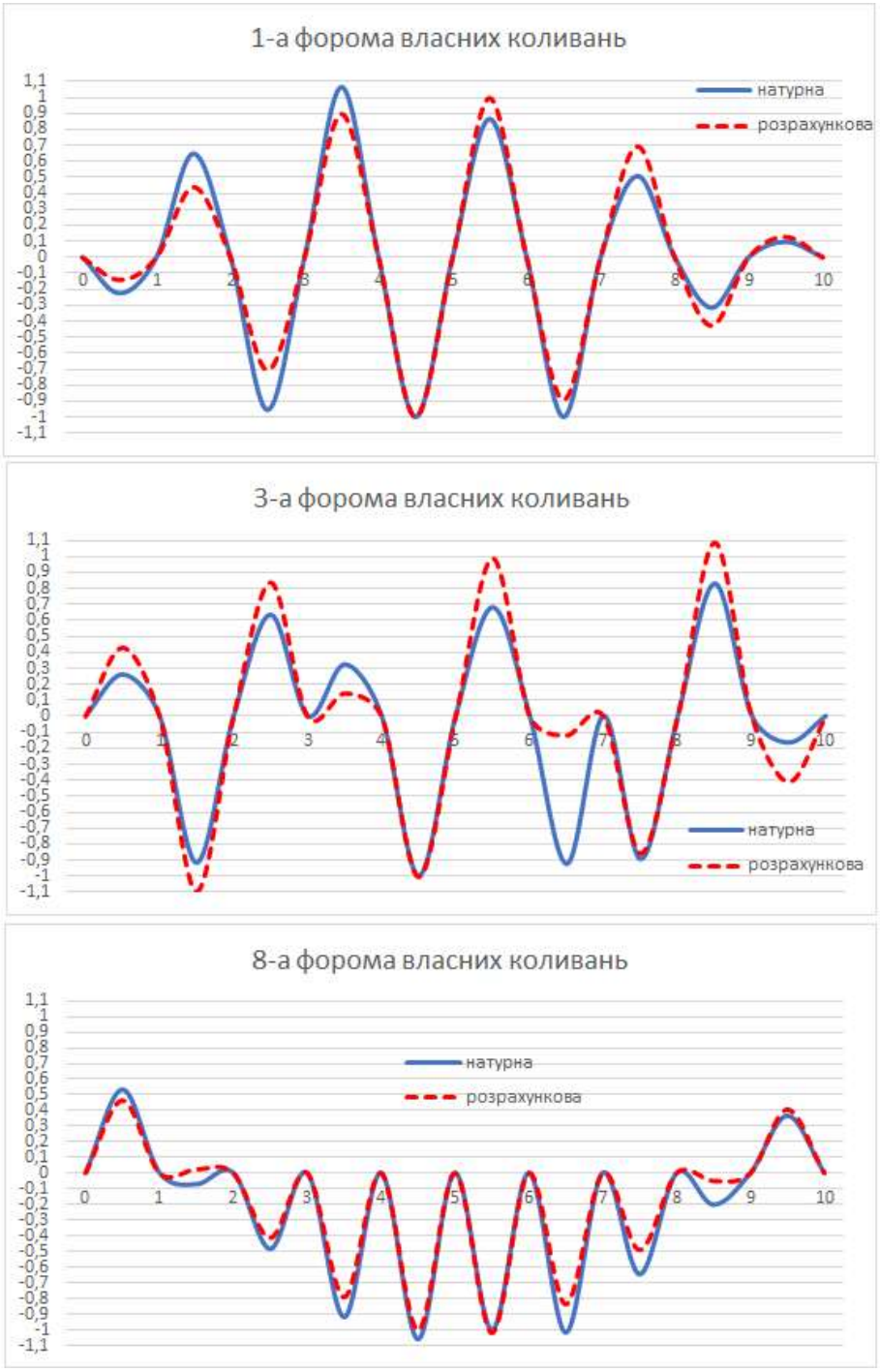


Рисунок 7 – Графічне представлення власних форм коливань прогонової будови у вертикальній площині за їх нормалізованими ординатами: натурними та розрахунковими

Figure 7 – Graphical representation of the span structure natural vibration modes in the vertical plane by their normalized ordinates: experimental and calculated

Фактичну інтегральну жорсткість перерізу прогонової будови визначали відповідно до ДСТУ 8748 [6] за визначеним випробуванням значенням власної частоти (перша форма у вертикальній площині) та фактичним значенням маси прогонової будови на час випробувань.

Розрахункове значення жорсткості перерізу прогонової будови визначали за розрахунковим значеннями моменту інерції перерізу та модулем пружності для бетону класу В35 ($3{,}52 \cdot 10^5$ кг/см^2). Масу прогонової будови визначали за натурними обмірами та питомою вагою відповідних матеріалів: m = 17 050 кг/м.

Розрахункова жорсткість повного перерізу, який включає збірний та монолітний залізобетон, має наступне значення:

EIр = $3{,}47 \cdot 10^8 \times 3{,}52 \cdot 10^5 = 1{,}22 \cdot 10^{14}$ (кг·см^2).

Розрахункова жорсткість перерізу, який включає лише збірний залізобетон:

EIр = $2{,}79 \cdot 10^8 \times 3{,}52 \cdot 10^5 = 0{,}98 \cdot 10^{14}$ (кг·см^2).

Фактичне значення інтегральної жорсткості за результатами випробування визначали згідно з ДСТУ 8748 [6] з використанням засобів Mathcad. Параметр «**a**», який встановлює пропорційну залежність між частотою власних коливань і відношенням інтегральних жорсткості та маси визначали розрахунком балкової моделі. Фактична інтегральна жорсткість прогонової будови мала значення EIф = $1{,}09 \cdot 10^{14}$ кг·см^2. Значення фактичної жорсткості прогонової будови менше від жорсткості перерізу при включенні в роботу ділянок монолітного бетону, але перевищує жорсткість її перерізу, який включає лише збірний залізобетон. Величина цього перевищення становить лише 10 %, що є менше за середні значення для прогонових будов даного типу.

Отримані результати свідчать про поступове зниження інтегральної жорсткості після 2009 року. Зменшення оцінюється приблизно у 10 % при рівномірному розподілі по довжині споруди та може досягати 20 % на окремих локальних ділянках. Згідно з критеріями ДСТУ 9181 [1], зафіксований стан класифікується як «обмежено працездатний» і вимагає уточнення шляхом проведення додаткового детального обстеження.

Подальші візуально-інструментальні дослідження під час обстеження підтвердили отримані результати, оскільки було виявлено руйнування контрольних маяків, встановлених на тріщинах у блоках прогонової будови, а також нові розкриті тріщини в інших елементах. Це свідчить про наявність розвитку дефектів, що впливають на зниження жорсткості та потребують врахування при оцінюванні залишкового ресурсу споруди.

Висновки. Проведені дослідження засвідчили, що імпульсний метод є ефективним інструментом модального контролю, який забезпечує отримання фактичних характеристик жорсткості прогонової будови моста без застосування складних випробувальних схем. Для розглянутого прикладу натурної споруди вимірювання показали стабільність частот протягом 2003 – 2009 років та їх зниження приблизно на 3 % станом на 2023 рік, що вказує на зменшення інтегральної жорсткості прогонової будови. Отримані результати дозволили визначити можливі ділянки прогонової будови з дефектами, що скоротило час на її обстеження. У сучасних умовах інтенсивної експлуатації мостів та зростання впливу великовагового транспорту застосування імпульсних випробувань є особливо актуальним, оскільки дозволяє оперативно оцінювати зміну жорсткості конструкції та виявляти її приховані дефекти.

Перелік посилань

1. ДСТУ 9181:2022. Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2022. 32 с. (Інформація та документація).

2. Редченко В. П. Розвиток методів динамічних випробувань мостів та алгоритмів спектрального аналізу для опрацювання їх результатів : д.т.н. : спец. 05.23.01. Дніпро, 2012.

3. Редченко В. П. Визначення розподілу зусиль між балками прогонової будови за результатами її випробування імпульсним навантаженням. *Збірник наукових праць Українського наук.-дослідн. та проектного інституту сталевих конструкції імені В. М. Шимановського*. 2009. Вип.3. С. 165–171.

4. Редченко В. П. Ідентифікація дефектів споруд методами динамічної діагностики. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2010. Вып.52. Ч.2. С. 100–104.

5. Редченко В. П. Розвиток методів динамічних випробувань автодорожніх мостів. *Вісник національного університету «Львівська політехніка».* 2010. № 664. С. 164–171.

6. ДСТУ 8748:2017. Настанова щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів. Київ, 2018. 22 с. (Інформація та документація).

7. Редченко В. П., Завгородній С. С. Динамічні випробування мостів. Загальний огляд методів. *Дороги і мости*. 2024. Вип. 29. С. 293–306. DOI: 10.36100/dorogimosti2024.29.293

8. Редченко В. П., Завгородній С. С. Динамічні випробування мостів імпульсним навантаженням. *Дороги і мости*. 2023. Вип. 28. С. 185–194. DOI: 10.36100/dorogimosti2023.28.185

9. De Angelis A., Esposito G., Maddaloni G., Cosenza E., Pecce M.-R. Ambient vibration test on an existing prestressed concrete bridge. *Eccomas Proceedia COMPDYN 2021*. 2021. P. 3720-3730. DOI: 10.7712/120121.8741.18728

10. Kien Ph. H. Application of impact vibration test method for bridge substructure. *Evaluation MATEC Web of Conferences*. 138, 02017 (2017). DOI: 10.1051/matecconf/201713802017

11. Gentile C., Saisi A. Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. *Construction and Building Materials*. 21 (2007). 1311–1321. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007

12. Fabrizio Gara F., Nicoletti V., Carbonari S., Ragni L., Dall'Asta A. Dynamic monitoring of bridges during static load tests: influence of the dynamics of trucks on the modal parameters of the bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring.* 2020. Volume 10. 197–217. DOI: 10.1007/s13349-019-00376-1

13. МР В.2.3-37641918-944:2024. Методичні рекомендації щодо модального контролювання автодорожніх мостів для визначення їхнього технічного стану. Київ, 2024. 54 с. (Інформація та документація).

EXPERIENCE OF IMPULSE TESTING OF HIGHWAY BRIDGES WITHIN THE FRAMEWORK OF MODAL CONTROL

Onyshchenko Artur M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1040-4530

Kaskiv Volodymyr I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Scientific Work, State Enterprise "National Institute for Infrastructure Development" (SE "NIRI"), Kyiv, Ukraine, e-mail: vk@nidi.org.ua, https://orcid.org/0000-0002-8074-6798

Redchenko Vasyl P., Doctor of Technical Sciences, Director of PSP "Most-Service", Dnipro, Ukraine e-mail: rvp50@meta.ua, https://orcid.org/ 0000-0001-5938-1467

Zavhorodniy Serhiy S., Head of the Center for Bridges and Building Structures, State Enterprise "National Institute for Infrastructure Development" (SE "NIRI"), Kyiv, Ukraine, e-mail: serhiy.zavhorodniy@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1928-4544

Summary. The article presents research results focused on evaluating the technical condition of road bridges using impulse testing as part of modal control. Theoretical principles and practical aspects of applying impulse loading are considered. Such loading is produced by a short-time dynamic impact on the span structure. An example of field testing of a large bridge is described, where free vibrations were excited by dropping a load onto the roadway. The vibration response was recorded with seismic sensors, and the signals were processed using a spectral analysis program.

The obtained results made it possible to identify natural frequencies, damping decrements, and mode shape ordinates. They were also compared with finite element models. A decrease in natural frequencies compared to previous tests was observed, which indicates a reduction of the integral stiffness of the span structure. According to DSTU 9181:2022 Guidelines for assessment and forecasting of the technical condition of road bridges, the technical state of the structure was preliminarily evaluated as level 4 – "limited serviceable."

The findings confirm the relevance and usefulness of impulse testing for quickly obtaining dynamic characteristics of bridges, identifying stiffness reduction trends, and improving the assessment of the technical condition of structures.

Keywords: highway, natural vibration modes, defect, dynamic testing, stiffness, bridge, modal control, parameter, span structure, technical condition.

References

1. DSTU 9181:2022 Sporudy transportu. Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 9181:2022) Transport buildings. Instructions for assessing and forecasting the technical condition of road bridges]. Kyiv. 2022. 121 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

2. Redchenko V. P. Development of methods for dynamic testing of bridges and spectral analysis algorithms for processing their results: Doctor of Technical Sciences: specialty 05.23.01. Dnipro, 2012. [in Ukrainian].

3. Redchenko V. P. Vyznachennia rozpodilu zusyl mizh balkamy prohonovoi budovy za rezultatamy yii vyprobuvannia impulsnym navantazhenniam. *Zbirnyk. naukovyh prats Ukrainskoho nauk.-doslidn. ta proektnoho instytutu stalevykh konstruktsii imeni V. M. Shymanovskoho*. 2009. Vyp.3. P. 165–171. [in Ukrainian].

4. Redchenko V. P. Identyfikatsiia defektiv sporud metodamy dynamichnoi diahnostyky. *Stroytelstvo, materyalovedenye, mashynostroenye.* 2010. Vyp. 52. Ch.2. P. 100–104. [in Ukrainian].

5. Redchenko V. P. Rozvytok metodiv dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh mostiv. *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika».* 2010. № 664. P. 164–171. [in Ukrainian].

6. DSTU 8748:2017 Nastanova shchodo provedennia dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 8748:2017) Guidelines for dynamic testing of road bridges]. Kyiv, 2018. 22 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

7. Redchenko V., Zavhorodnii S. Dynamic testing of bridges. General overview of methods. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. 2024. Issue 29. P. 293–306. DOI: 10.36100/dorogimosti2024.29.293 [in Ukrainian].

8. Redchenko V., Zavhorodnii S. Dynamic testing of bridges with impulse loading. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. 2023. Iss. 28. P. 185–194. DOI: 10.36100/dorogimosti2023.28.185 [in Ukrainian].

9. De Angelis A., Esposito G., Maddaloni G., Cosenza E., Pecce M.-R. Ambient vibration test on an existing prestressed concrete bridge. *Eccomas Proceedia COMPDYN 2021*. 2021. P. 3720-3730. DOI: 10.7712/120121.8741.18728

10. Kien Ph. H. Application of impact vibration test method for bridge substructure. *Evaluation MATEC Web of Conferences*. 138, 02017 (2017). DOI: 10.1051/matecconf/201713802017

11. Gentile C., Saisi A. Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. *Construction and Building Materials*. 21 (2007). 1311–1321. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007

12. Fabrizio Gara F., Nicoletti V., Carbonari S., Ragni L., Dall'Asta A. Dynamic monitoring of bridges during static load tests: influence of the dynamics of trucks on the modal parameters of the bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring.* 2020. Volume 10. 197–217. DOI: 10.1007/s13349-019-00376-1

13. MP V.2.3-37641918-944:2024 Metodychni rekomendatsii shchodo modalnoho kontroliuvannia avtodorozhnikh mostiv dlia vyznachennia yikhnoho tekhnichnoho stanu [Methodical recommendations for modal control of road bridges to determine their technical condition]. Kyiv. 2024. 54 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

УДК 624.5
UDC 624.5

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-312-329

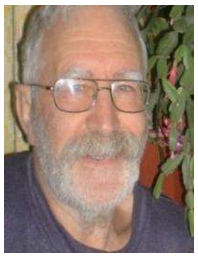
МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ВИТОКУ МАСИ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

METHOD OF ASSESSMENT OF LIQUID MASS LEAKAGE IN THE PIPELINE DURING OPERATION



Онищенко Артур Миколайович, *доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд,професор Національний транспортний університет, Київ, Україна, e- mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, тел. +380687771899,*

https://orcid.org/0000-0002-1040-4530



Островерх Борис Миколайович*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: borys.ostro@gmail.com.*

https://orcid.org/0000-0002-3373-5535



Чиженко Наталія Петрівна, *кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: chyzhenko_np@ukr.net, тел. +380507355080,*

https://orcid.org/0000-0002-9152-2474



Аксьонов Сергій Юрійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, Aksenov121@gmail.com, тел. +380971534406,*

https://orcid.org/0000-0002-6749-3909



Мошківський Роман Володимирович, *аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна e-mail: moshkjoma@gmail.com, тел. +380672357174,*

https://orcid.org/0009-0004-9471-4238

Анотація. При розробці документів, що передбачені Законом України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» виникла необхідність розрахунку кількості аміаку, яка може прийняти участь у надзвичайній ситуації під час аварії на лінійній частині аміакопроводу. Нормативними документами передбачений розгляд випадку надзвичайної ситуації з гільйотинним розривом трубопроводу.

Загальна маса небезпечної речовини, що бере участь у аварії вираховується як сумарна маса, що міститься в лінійній частині трубопроводу між двома запірними пристроями, і сумарна маса, що може виділитися протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв. Необхідно розрахувати масу аміаку, що може виділитися по прямому і зворотному напрямку протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв. Визначена загальна маса небезпечної речовини після аварії ділянки аміакопроводу як сумарна маса в лінійній частині трубопроводу між двома запірними пристроями, і сумарна маса, що може виділитися протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв за схемою гільйотинного розриву.

Ключові слова: аварії аміакопроводів, гільйотинний розрив, термогідродинамічна теорія течії, гідравлічне наближення.

Вступ. ДП «Укрхімтрансаміак» експлуатує магістральний аміакопровід, який є об'єктом підвищеної небезпеки (далі ОПН) першого класу. При розробці документів, що передбачені Законом України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» виникла необхідність розрахунку кількості аміаку, яка може прийняти участь у надзвичайній ситуації під час аварії на лінійній частині аміакопроводу. Нормативними документами передбачений розгляд випадку надзвичайної ситуації з гільйотинним розривом трубопроводу.

Загальна маса небезпечної речовини, що бере участь у аварії вираховується як сумарна маса, що міститься в лінійній частині трубопроводу між двома запірними пристроями, і сумарна маса, що може виділитися протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв.

Сумарна маса рідкого аміаку у кожній секції лінійної частини між двома запірними пристроями вираховується досить просто. Такі розрахунки уже зроблені.

Наразі необхідно розрахувати масу аміаку, що може виділитися по прямому і зворотному напрямку протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв. Висока точність такого розрахунку не потрібна. Тому, для спрощення розрахунку необхідно визначити і прийняти певні допущення. Запропоновано прийняти середні параметри, а саме:

– тиск в секції – 50 кг/см^2;

– довжина секції - 6000 м;

– розгерметизація - гільйотинний розрив посередині секції;

– густина рідкого аміаку в секції – 0,627 т/м^3;

– встановлений час для виявлення витоку речовини та здійснення (виконання) наказу перекриття запірних пристроїв складає 90 секунд;

– з них час перекриття запірних пристроїв після надання команди складає 60 секунд, під час перекриття швидкість витоку аміаку зменшується лінійно від початку до повного перекриття запірних пристроїв;

– наявність зворотних клапанів на лінійній частині секції не враховується.

– виключення насосів прямої (нагнітання) та зворотньої (всмоктування) частин секції та запирання затворів – відбувається одночасно за сценарієм (пропонується продовження роботи на зворотній ділянці секції)

– зважаючи, що більша частина трубопроводу укладена під землею на глибині до 1.4 м треба врахувати можливість утворення вирви глибиною до 3 м, що може затримати остаточний витік аміаку з трубопроводу.

Розрахунок потрібно виконати для двох діаметрів трубопроводу, а саме:

1.Зовнішній діаметр труби D_1- 355,6 мм, товщина стінки h – 7,92 мм;

2.Зовнішній діаметр труби D_2 - 273 мм, товщина стінки h – 7,92 мм

Мета роботи є розробка моделі з оцінювання витоку маси рідини аміаку в трубопроводі при експлуатації .

Виклад основного матеріалу. Аналіз літературних джерел, що присвячені прогнозуванню рівня забруднення природного середовища при витоку аміаку показав, що розрахунки ведуться з використанням постійного значення інтенсивності викиду. Тобто, процес викиду вважається стаціонарним. Такий підхід є «спрощеним», і через те він не відображає фізику процесу викиду аміаку з аміакопроводу, що знаходиться під надлишковим тиском та створення ОПН. В реальності, процес викиду аміаку є нестаціонарним. Це означає, що навколишнє природне середовище буде отримувати навантаження різне за інтенсивністю. Тому, для адекватного оцінювання рівня забрудненості навколишнього природного середовища (НПС) необхідно враховувати зміну тиску з часом у ньому. У такій постановці загальна задача про нестаціонарний рух однорідного середовища, поставлена в рамках одновимірної задачі, є окремим випадком системи [5–8] і зводиться до розв'язування системи двох рівнянь у частинних похідних збереження маси та імпульсу[5]:

$$\partial P/\partial t = a^2\, \partial(\rho V)/\partial x \tag{1}$$

$$\partial P/\partial x = \partial(\rho V)/\partial t + \rho\lambda V\,|V|/2D, \tag{2}$$

де: V – середня швидкість несучого середовища по площі поперечного перерізу;
P – тиск в системі;
ρ – щільність несучого середовища;
a – швидкість поширення звуку;
λ – коефіцієнт гідравлічного опору;
D – діаметр трубопроводу.

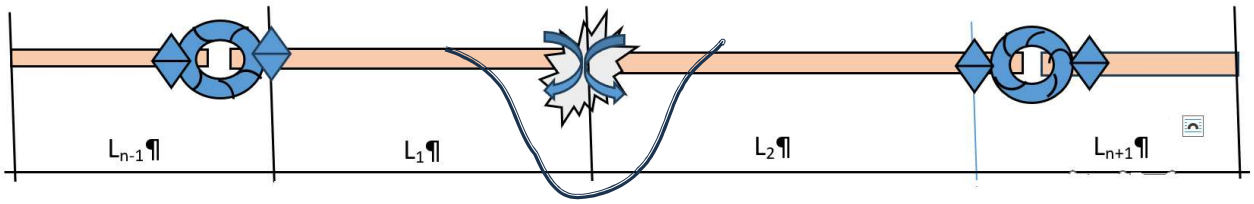
Як більш загальна система рівнянь руху [6], так і спрощена система рівнянь (1-2) належать до гіперболічного типу і для їх розв'язування можна використовувати одні й ті ж аналітичні та чисельні методи. Іншими словами, задаючи початкові та граничні умови (також знаючи закон зміни ρ, λ та a), систему рівнянь (1) можна принципово розв'язати для різних режимів роботи високошвидкісних трубопровідних систем.

Водночас слід зазначити, що правильне завдання граничних умов і вибір зручного методу розв'язування системи (1) найчастіше пов'язане з певними труднощами. У науковій літературі широко використовуються як аналітичні, так і чисельні методи розв'язування систем гіперболічних рівнянь. У зв'язку з нелінійністю системи (1) при використанні аналітичних методів розв'язування передбачається проводити попередню лінеаризацію вихідних рівнянь. Більшість авторів, вирішуючи такі задачі, проводили лінеаризацію системи (1), замінюючи доданок $\lambda V|V|$ на його постійне значення, що дорівнює середньому значенню за координатою та часом. Крім того, при вирішенні конкретних задач зазвичай приймається ρ = const, що виключає можливість фазових переходів. Наведені вище припущення призводять до того, що не завжди вдається досягти задовільної відповідності між розрахунковими та експериментальними даними. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки універсального методу розв'язування системи (1). Цілком очевидно, що в такій ситуації можна використовувати лише чисельні методи розрахунку. Найпопулярнішим методом розв'язання системи (1) досі вважається метод характеристик.

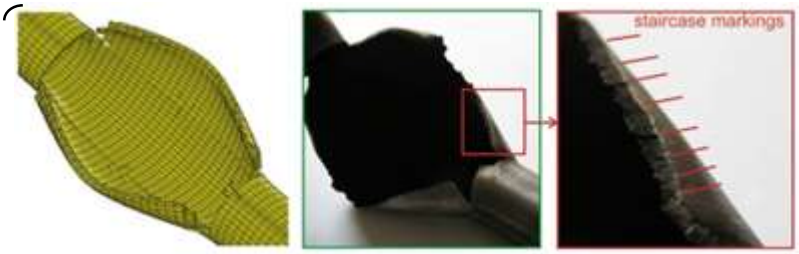
Після аналізу різних чисельних алгоритмів прийнято явні різницеві схеми Лакса та Лакса–Вендрофа, які добре зарекомендували себе в галузі газової динаміки. У цій постановці змогли використати вихідну систему рівнянь (1) для розв'язання деяких задач у сфері не лише руху однорідної рідини, а й гідротранспорту різних твердих дисперсних матеріалів у трубах у режимі розвиненої турбулентності [6–8].

В роботі [1] розглянуто процес розрахунку нестаціонарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу. В даній роботі розглядається чисельна модель, побудову якої створено в гідравлічному наближенні. Особливістю запропонованої моделі є те що вона враховує нестаціонарний процес витоку аміаку з трубопроводу, тобто змінну з часом витрату аміаку, що потрапляє в природне навколишнє середовище. Інший алгоритм витікання запропоновано у праці Van den Bosch C.J.H. [19] , де витікання рідини розглядається за сценарієм, що описано нижче.

Моделювання витікання рідини через отвори та трубопроводи спрямоване на прогнозування масової витрати як функції перепаду тиску. Для рідин, що протікають через отвір, можна застосувати рівняння Бернуллі. Нехтуючи початковою швидкістю рідини в посудині, можна оцінити масову швидкість потоку. Проведення розрахунків за методикою є неможливою через відсутність більшості параметрів для зрідженого аміаку, які є результатом спеціальних експериментальних досліджень [1].



а)



б)

Рисунок 1 – Схема зруйнованої ділянки (секції) пошкодженого трубопроводу (а) та варіант реального розриву (б)

Figure 1 – Scheme of the destroyed section (section) of the damaged pipeline (a) and the real gap option (b)

Для проведення розрахунків на базі запропонованої моделі гідравлічного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу, в якості початкових даних, використані такі фізико-технічні параметри:
– площу отвору в аміакопроводі;
– довжину секції труби;
– надлишковий тиск в аміакопроводі на момент аварії;
– розрахунковий крок за часом ;
– коефіцієнт витрати через розрив μ =0.18–1.0;
– коефіцієнт гідравлічного тертя (шорсткості) f у трубопроводі (наявність внутрішнього облицювання);
– коефіцієнт об‘ємного стиснення, β;
– кінематична в‘язкість рідини (аміаку), ν .

Було проведено декілька обчислювальних експериментів щодо зміни надлишкового тиску в аміакопроводі та маси аміаку, що викидається з нього у випадку появи отвору шляхом покрокового наближення рівнянь (1-2). Розрахунок виконано на базі побудованої моделі для площини отвору S м^2 (ця площа дорівнює площі «живого» перерізу трубопроводу, тобто, такий розмір отвору можна трактувати, як «гільйотинний» розрив аміакопроводу). Результати експериментів наглядно вказують

(рис. 2), що значення надлишкового тиску в аміакопроводі змінюється з часом у вигляді поширення хвилі, що впливає на кількість емітованого в повітря аміаку.

Програмна реалізація гідравлічного підходу [1] до розглянутої моделі виконана на алгоритмічній мові, що імплементована в кодах «Exel». Ця програма виконує прогнозні розрахунки на ПК з оцінки рівня забруднення атмосферного повітря та поверхні землі у випадку викиду аміаку за сценарієм гільйотинного розриву трубопроводу. Розрахунки показали, що перший етап викиду аміаку з пошкодженого трубопроводу (викид за рахунок надлишкового тиску) закінчується приблизно за 180 с, тобто пізніше повного закриття затворів (90 сек.), і таким чином зруйнована секція може вважатися закритою з одного боку та вільно відкритою – з іншого. Розрахунок завершується після досягнення поверхні фазового переходу до затвору та починається другий етап – випаровування аміаку та повний витік газу, що легше повітря, з пошкодженого трубопроводу.

У заданій постановці обидві частини зруйнованої секції мають однакову довжину і є абсолютно ідентичні одна одній та витікають в одне місце (рис. 1). Тому всі параметри стосовно обсягів витікання зрідженого газу для отримання остаточних результатів збільшуються у 2 рази.

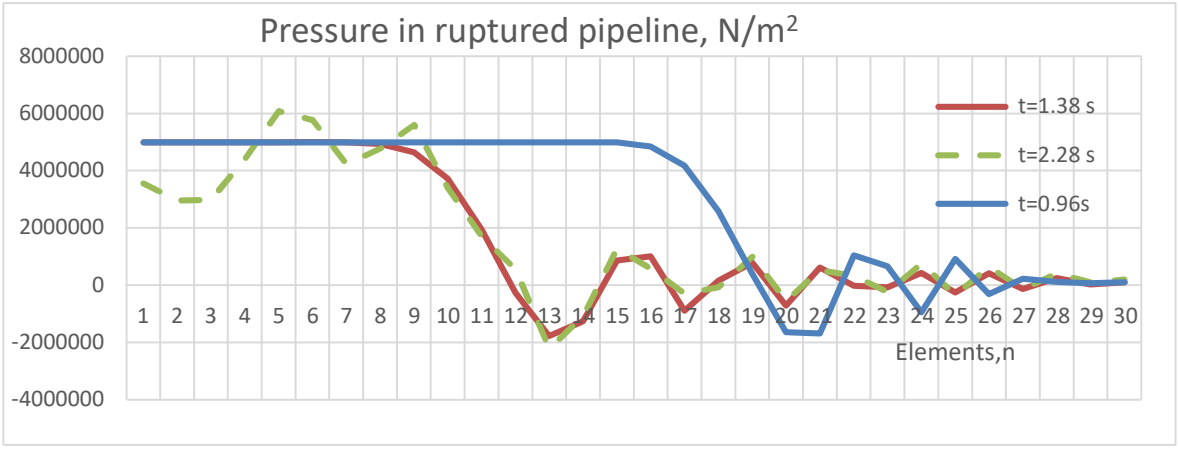


Рисунок 2 – Результати розрахунків поширення хвилі падіння тиску в зруйнованій секції аміакопроводу

Figure 2 – Results of pressure drop wave propagation calculations in the destroyed section of the ammonia pipeline

Перш за все визначаємо об'єм аміаку в секції (довжина секції *L,* м) за відсутності надлишкового тиску ΔP_s:

$$W = S\,L, \tag{4}$$

де $S = \pi d^2/4$ ($м^2$) – площа поперечного перерізу трубопроводу,
d =0.3556 м – діаметр та довжина L трубопроводу.

Згідно того, що до пошкодження аміакопроводу слід виділити наступні етапи:

1) Витікання рідини (зрідженого газу) з отвору, що утворився в результаті аварії на середині секції, під вибуховою чи розривною дією, при наявності відкритих секційних затворів не відбувається під тиском із сусідніх заповнених секцій, якщо термін повного фазового переходу зрідженого аміаку в зруйнованій секції більше терміну повного перекриття, то можна вважати стаціонарною від моменту руйнування до отримання команди і до повного перекриття затворів

з відокремленої секції відбувається витіснення залишків газу аміаку повітрям. Таким чином, об‘єм витоку зрідженого газу не може бути більше обсягу витоку визначеного за першим етапом плюс обсяг газу, що залишається в розрахунковій секції.

2) Якщо термін повного фазового переходу зрідженого аміаку в зруйнованій секції більше терміну повного перекриття, то після перекриття затворів відбувається витікання надлишкового об‘єму газу аж до повного випорожнення аміаку і заміною його повітрям.

Головною задачею встановлюємо визначення швидкості руху поверхні розділу (інтерфейсу) рідкої та газообразної фаз існування аміаку в трубопроводі.

Процес розрахунку викиду аміаку з труби згідно [1] запропоновано поділяти на два етапи:

1. Перший етап – напірний викид аміаку як рідини з трубопроводу внаслідок надлишкового тиску ΔP_s^n в ньому до повної зупинки насосів та закриття затворів. Масу аміаку, який витікає з пошкодженого трубопроводу, подано так:

$$M= M_1+M_2, \quad (5)$$

де M_1– маса аміаку, що потрапить в атмосферу в разі напірного викиду з пошкодженого трубопроводу;
M_2– маса аміаку, що витікає після напірного викиду аміаку.

$$\text{Емісія зрідженої маси} \quad M=V\rho \quad (6)$$

2. Другий етап – викид аміаку за рахунок його вільного втікання (скидання надлишкового тиску) після закриття затворів. Як варіант в [11] пропонується ітераційний метод з припущенням про стисливість зрідженого аміаку.

1. Розраховуємо масу аміаку у трубі за умови, коли не було б надлишкового тиску та зріджений аміак заповнював би трубопровід як нестислива рідина:

$$M = \rho W \quad (7)$$

де ρ – щільність аміаку (ρ =0,627 кг/м^3).

2. Визначаємо «надлишковий» об’єм аміаку в секції за наявності надлишкового тиску ΔP_s:

$$\Delta W= \beta W \Delta P_s^n \quad (8)$$

де β – коефіцієнт об’ємного тиску.

3. Визначаємо «надлишкову» масу аміаку ΔM в секції за надлишкового тиску: ΔP_s

$$\Delta M= \rho \Delta W \quad (9)$$

5. Визначаємо об’єм аміаку, що виходить з отвору в трубопроводі за час Δt:

$$Q = \mu \cdot \omega \sqrt{2g \frac{\Delta P_s^n}{\gamma}} \Delta t ,$$

$$Q= \Delta t\ \mu\ \omega\ \mathrm{sqrt}(2gP^n_s/\gamma) \quad (10)$$

де ω – площа отвору, з якого витікає аміак;
μ – коефіцієнт витрати;
γ – питома вага.

4. Визначаємо масу аміаку, що виходить з отвору в трубопроводі за час t:

$$\Delta m = \rho Q \tag{11}$$

5. Визначаємо «надлишковий» об'єм та масу аміаку, що залишилася в трубі після часу Δt :

$$\Delta W^{n+1} = \Delta W Q , \tag{12}$$

$$\Delta M^{n+1} = \rho \Delta M - \Delta m, \tag{13}$$

де позначка $n+1$ – відповідає значенню параметра на новому часовому кроці.

Відзначимо, що значення n відповідає значенню фізичного параметра на попередньому часовому кроці.

6. Визначаємо зміну надлишкового тиску в трубі внаслідок витоку аміаку за час Δt:

$$\Delta P_s^{n+1} = \Delta P_s^n - \Delta P, \tag{14}$$

де:

$$\Delta P = \Delta W^{n+1}/(W\beta) \tag{15}$$

9. Далі розрахунок повторюємо, починаючи з п. 4, та визначаємо нові значення ΔM, Q, ΔW, ΔP на новому часовому кроці.

Алгоритм попереднього розрахунку об'єму викиду аміаку (маси аміаку M_1 та інших параметрів) на першому етапі без перекриття запірних пристроїв:

$$V_{T30} = Q_1 * 30 \tag{16}$$

Після надання команди початку закриття затвору термін згідно завдання складає 60 секунд, коли швидкість витоку аміаку зменшується лінійно від початку до повного перекриття запірних пристроїв будемо виконувати в такій послідовності:

$$V_{T90} = V_{T30} + Q_1 * (n-(n+1)/2), \tag{17}$$

Результатом роботи програми є динаміка зниження надлишкового тиску в трубопроводі, зміна висоти струменя аміаку з часом, динаміка зміни з часом маси аміаку, що виходить з трубопроводу. Ці дані використовуються в «Exel» на етапі проведення розрахунку формування зон забруднення.

Розрахунок за цими залежностями закінчується, коли надлишковий тиск у пошкодженому трубопроводі буде дорівнювати нулю. На цей момент часу маса аміаку, викинута з пошкодженого трубопроводу, буде дорівнювати M_1 (рис. 3). У трубопроводі залишиться маса аміаку M_2. Слід підкреслити, що для розрахунку витрати аміаку на базі залежності (1) використано експериментальні значення коефіцієнта витрати отвору, отримані раніше [12].

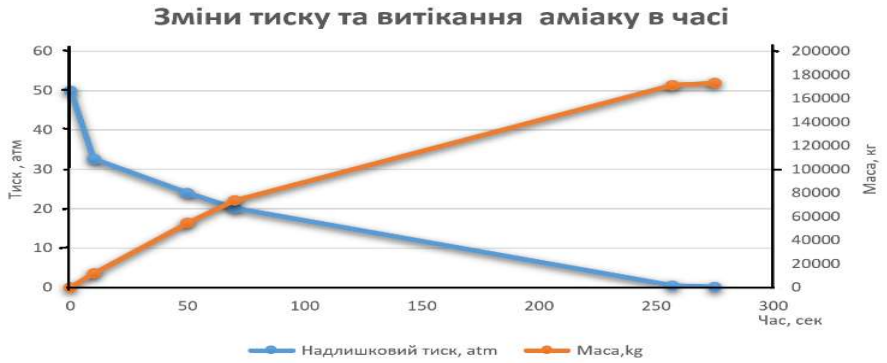


Рисунок 3 – Результат ітераційного процесу витікання аміаку з трубопроводу [11]
Figure 3 – The result of the iterative process of ammonia leakage from the pipeline [11]

Визначення коефіцієнту всебічного стиснення виконується на основі міркувань про зменшення об‘єму тіла та відповідного збільшення щільності, що можна записати наступним чином [1]

$$dV = -\frac{1}{K} V dP \,, \tag{18}$$

де V – об‘єм під деяким тиском P,
dV – зміна (прирощення) обсягу при збільшенні тиску на dP.

Коефіцієнт (K) – модуль об‘ємного стиснення чи інакше – об‘ємної пружності . На практиці частіше користуються зворотною величиною, яка називається стисливістю (коефіцієнтом стиснення, Volume compress. coeficient):

$$\beta = \frac{1}{K} = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dp} \quad . \tag{19}$$

Для газів іноді зручніше рівняння (19) записати відносно зміни маси M. Помножимо обидва члени відношення (19) на значення густини газу ρ і враховуючи співвідношення $M = \rho$ V отримаємо

$$\beta = -\frac{1}{M}\frac{dM}{dp} \tag{20}$$

звідки можна визначити стисливість.

Поняття модуля об‘ємного стиснення (стисливості) застосовується не тільки до твердих тіл, але й до рідин та газів. Стисливість газів залежить від того зворотного процесу, яким виконується стиснення. Легко визначити, що для ізотермічного стиснення ідеального газу стисливість дорівнює $\beta = p$, а для адіабатичного стиснення – $\beta = \gamma p$, де γ – показник адіабати.

З матеріалів роботи [1] не зрозуміло, якими даними про стисливість зрідженого газу користується автор, проте результати розрахунків якісно та кількісно збігаються із запропонованими.

Гідравлічний розрахунок є важливою складовою процесу вибору методу розрахунку ситуації розриву трубопроводу. На наш погляд, це пов'язано зі спробою описати всі варіанти розрахунку коефіцієнта тертя в залежності від режиму потоку, типу рідини і її температури, а також від шорсткості труби, а головне із зміною сценарію процесу у зв‘язку з необхідністю враховувати фазовий перехід від однофазної до двофазної рідини, а потім до крапельно-газової суміші (пару) та, нарешті, газу. З метою

більш детального аналізу запропонованих в документах методів розрахунку представляється корисним повернутися до вихідних рівнянь класичної гідродинаміки [1].

Запропонований алгоритм розрахунку витікання рідини розглядається за такою методикою:
– Моделювання витікання рідини через отвори та трубопроводи спрямоване на прогнозування масової витрати як функції перепаду тиску. Для рідин, що протікають через отвір, можна застосувати рівняння Бернуллі. Нехтуючи початковою швидкістю рідини в отворі, можна оцінити масову швидкість потоку:

$$q_s = C_d * A_h * \sqrt{(2(P - P_a) * q_l)} \tag{22}$$

де $P = P_h + P_{aL}$ (23)

$$P_h = {}^{p}{}_{L} * g * h_L \tag{24}$$

де: A_h – площа отвору
Cd – коефіцієнт витрат
P –загальний тиск у трубопроводі
P_a –атмосферний тиск
q_S – інтенсивність потоку маси
ρ_L – щільність рідини

Падіння тиску для стаціонарного потоку рідини в трубопроводі можна оцінити за допомогою відомого рівняння Дарсі-Вейсбаха [1]:

$$\Delta P = f_D * \rho_f / 2 * u_f{}^2 * l_p / d_p \tag{25}$$

Використовуючи це рівняння, можна отримати вираз для (середньої) швидкості потоку рідини в трубі

$$u_L = \mathrm{sqrt}(2 \cdot \Delta P / \rho l_p \cdot dp / (f_D \cdot \rho_L)) \tag{26}$$

Масову витрату в трубі можна розрахувати за допомогою:

$$q_S = \rho u_L A_{pipe} \tag{27}$$

У формулах (25-27) dp –діаметр трубопроводу
f_D –фактор тертя Darcy
l_p –довжина трубопроводу
u_L –швидкість течії рідини
ΔP – зміна тиску
ρ_L – щільність рідини

Відповідно до наведених вище рівнянь, масова швидкість потоку через трубу залежить від тертя в трубі. Загалом коефіцієнт тертя є функцією числа Рейнольдса [1]. Число Рейнольдса в залежності від швидкості потоку в трубі можна виразити як функцію масової витрати

$$Re = f(q_S) \tag{28}$$

Для круглої труби:

$$Re = (4/\pi) \cdot q_s/(d_p\eta) \quad (29)$$

Це означає, що масова витрата з труби повинна бути розрахована шляхом ітерації через те, що втрата напор ⁄h_{Lp} і падіння тиску пов'язані :

$$P = \rho_f \, g⁄h_{Lp} \qquad (N/m2) \quad (30)$$

Як видно з рівняння (25) [1], коефіцієнт Дарсі є функцією числа Рейнольдса та відносної шорсткості стінки (відношення між шорсткістю стінки та діаметром труби). Для шорсткості стін можна використовувати значення в таблиці нижче.

Падіння тиску для стаціонарного потоку рідини в трубопроводі також часто оцінюється рівнянням Дарсі-Вейсбаха, в якому використовується коефіцієнт тертя Фаннінга f_F:

$$\Delta P = 4 \times f_F \times \rho_f/2 \times u_f^2 \times l_p/d_p \quad (31)$$

З рівнянь (2.198) і (2.204) легко зробити висновок, що коефіцієнт тертя Фаннінга в чотири рази менший за коефіцієнт тертя Дарсі:

$$4f_F = f_D \quad (32)$$

Для ламінарного потоку коли $Re < 2000$

$$f_D = 64/Re \quad (33)$$

Для турбулентної течії та гладкої труби виконується рівняння Блазіуса:

$$f_D = 0.3164Re^{-0.25} \quad \text{якщо} \quad 4000 < Re < 10^5 \quad (34)$$

Тертя є одним із факторів, що визначають швидкість течії в трубі. Оскільки коефіцієнт тертя залежить від числа Рейнольдса, яке є функцією швидкості, звичайно слід застосовувати ітераційну процедуру для оцінки масової витрати у трубі. Однак згідно з дослідженнями коефіцієнту тертя в трубах [1] виявляється, що коефіцієнт тертя за досить високих чисел Рейнольдса є практично постійним.

Проведення розрахунків за наведеною методикою є неможливим через відсутність більшості параметрів для зрідженого аміаку, які є результатом спеціальних експериментальних досліджень [1].

Розвиток методики розрахунку течії з руйнованого трубопроводу [1] створено на базі робіт [6-8] , де враховується процес фазового переходу у вигляді руху перетину інтерфейсу ділянок розділу двох фаз стисненого газу у стані зрідженої рідини та паро-газової суміші з врахуванням тертя. Рух поверхні інтерфейсу відбувається у зворотному напрямку витікання з трубопроводу.

При розгерметизації трубопроводу в області, що прилягає до місця розриву, встановлюється тиск, близький до тиску насиченого пару при відповідній середній температурі продукту, що транспортується. При цьому відбувається закипання частини рідини та збільшення її об'єму в трубі, а швидкість потоку лімітується пропускною здатністю кінцевої ділянки, тобто трубопровід працює як би в режимі часткового «замикання».

В роботі використовується модель однорідної рівноваги двофазного потоку [8], яка припускає, що після прориву в трубопроводі утворюються, два послідовних режими потоку.

Режим 1 - швидка розгерметизація (рис. 4)

Відразу після прориву тиск у трубі дуже швидко знижується від робочого тиску. Швидкість падіння регулюватиметься швидкістю звуку у рідині (або надкритичній рідині) у трубі, і ми припускаємо, що цей процес закінчується рідиною насиченою рідиною при деякій температурі T_0 і тиску $P_0=P_{sat}(T_0)$. Розширення, а отже, і викид рідини з розриву, буде регулюватися в першу чергу стисливістю рідини, яка невелика, особливо в масштабі пізнішого розширення через випаровування. Тому оцінки цього режиму призводять до висновку, що цей процес відбувається дуже швидко порівняно з тим, що йде далі, і що втрата рідини невелика, також порівняно з тим, що йде далі.

Режим 2 - поширення фронту зони закипання

Після режиму 1, ми маємо трубу, що містить насичену рідину в спокої, або перекачується з певною заданою швидкістю потоку. Вона почне випаровуватись і далі знижувати тиск.

Верхня зона (зона 1) – це насичена рідина, яка перебуває в стані спокою при постійній температурі T_0 і тиску $P_0=P_{sat}(T_0)$.

Рідина тече від межі розділу (b) до розриву (e), і коли вона рухається вниз за течією, газова фракція зростає, а тиск зменшується до деякого значення P_e в (e). Швидкість потоку через зону 2 поєднується з падінням тиску та швидкість розширення внаслідок випаровування між (b) і (e). Оскільки маса рідини в трубі зменшується, межа зони (b) рухається вгору проти течії та утворює фронт закипання, який розмиває рідину зони 1.

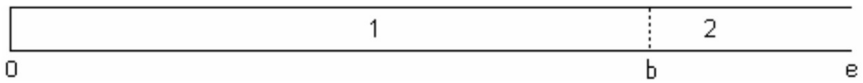


Рисунок 4 – Течія в режимі 2 в трубі. Зона 1 - насичена рідина в спокої. Зона 2 - це двофазна рідина, що тече зліва направо і з розриву (e). Частка газу в зоні 2 збільшується від нуля на межі розділу зон (b) по мірі руху вниз за течією до розриву (e).

F***igure 4 –*** Flow in mode 2 in the pipe. Zone 1 - saturated liquid at rest. Zone 2 is a two-phase fluid flowing from left to right and out of the discontinuity (e). The fraction of gas in zone 2 increases from zero at the interface of the zones (b) as it moves downstream to the gap (e).

Модель потоку в режимі 2

Суттєвими ознаками цього режиму є переміщення фронту зони насиченої рідини. Ми очікуємо, що фронт двофазної зони буде рухатися повільніше порівняно зі швидкістю рідини на виході, тому течію в двофазній зоні в цьому режимі доцільно вважати квазістаціонарною. Враховуючи нульову теплопередачу ззовні рідини, рівняння маси, імпульсу та енергії є стаціонарними. Моделі однорідної рівноваги передбачає рівні швидкості потоку обох фаз, $U_L = U_V$, а також термодинамічну рівновагу (температура і тиск) між рідкою і паровою фазами.

Граничні умови на верхній границі зони 2 на малюнку 4, дають значення T_0, $P=P_{sat}(T_0)$ - тиск насичення , $V_L(T_0)$ – питомий об'єм рідкої фази, $h_L(T_0)$ – ентальпія рідкої фази. На нижній границі зони 2 задається вихідний тиск P_e, значення якого між атмосферним тиском P_a та тиском насичення P_{sat}.

Тиск в трубопроводі задається рівнянням [8, 21]

$$\frac{dP}{dz} = \frac{2fV_L q^2(z)}{D_p A_p^2} \tag{35}$$

де $q(z)$ – масова витрата,

f –коефіцієнт тертя.

Якщо припустити, що масова витрата змінюється лінійно від початку двофазної зони до зони розриву

$$q(z) = q_e - \frac{q_e - q_i}{z_i} z \tag{36}$$

то підставивши масову витрату (36) в (35) і інтегруючи по z від P_e *до* P_{sat} , отримаємо формулу довжини двофазної зони

$$z_i = \frac{3d_p \times A_p^2 \times (P_{sat} - P_e)}{2f \times V_L \times q_e^2} \tag{37}$$

де d_p – внутрішній діаметр трубопровода,
A_p - площа поперечного перерізу.

Нехтуючи щільністю пари в порівнянні зі щільністю рідини масу витоку із розірваної труби дорівнює

$$Q_i = \frac{A_p \times z_i}{V_L} \tag{38}$$

де V_L – питомий об’єм рідкої фази.

Квазістаціонарна модель еволюції потоку в режимі 2 виглядає наступним чином:
1. Довжина двофазної зони, зона 2 на малюнку 4, спочатку дорівнює нулю. Починаємо з насиченої рідини при T_0, P_0 і початкової масової витрати потоку, яка визначається за формулою [19]

$$q_{s1} = A_p \times (p_0 - p_e) / u_s \tag{39}$$

де p_e – тиск на виході,
u_s- швидкість звуку рідкої фази аміаку,
A_p - площа поперечного перерізу трубопроводу.

2. Задаємо масову швидкість потоку, як частку попередньої масової витрати, яка зазвичай становить 5%

$$q_{s2} = (1 - \varepsilon) \times q_{s1} \tag{40}$$

3. Визначаємо середню масову швидкість потоку, як частку попередньої масової витрати

$$q_{s,avg} = 0.5 \times (q_{s1} + q_{s2}) \tag{41}$$

4. Обчислюємо довжину двофазної зони за формулою (37), де

$$q_e = q_{s,avg} \tag{42}$$

5. Обчислюємо масу витоку за формулою (38), де v_L – питомий об’єм рідкої фази .
6. Проміжок часу, за який здійснюється виток маси обчислюється за формулою

$$\Delta t_i = (Q_{i+1} - Q_i) / q_{s,avg} \quad (43)$$

Повторюємо числову процедуру для кожного нового часового кроку, починаючи з кроку 2, поки відстань до межі розділу Δl_i не перевищить довжину труби L_p або якщо час t менший за вказаний час.

Швидкість поширення двофазної зони визначається коефіцієнтом тертя. Коефіцієнт тертя для потоку у круглій трубі залежить від числа Рейнольдса та відносної шорсткості ε / d_p. При цьому різні алгоритми розрахунку дають суттєво різні результати. В нашому випадку коефіцієнт тертя був налаштований шляхом застосування наведеного вище алгоритму для пропану і порівняння результатів розрахунку з відомим рішенням задачі руйнування трубопроводу зрідженого пропану [19].

Проведено розрахунок розриву трубопроводу для секції L=3000 *м,* діаметру d =0.257 м регіонального трубопроводу та d =0.34 м магістрального трубопроводу для початкових умов і відповідних параметрів (таблиця 1).

Таблиця 1 **–** Параметри розрахунку
Table 1 – Calculation parameters

T_0,C	P_0 (10^5 н/м^2)	P_{sat} (10^5 н/м^2)	u_s (м/сек)	V_L (м^3/кг)	P_a (10^5 н/м^2)
15	50	7.28	1409.8	0.00162	1.013

Результати розрахунків для секції регіонального трубопроводу d =0.257 м Q_0 =96120 кг наведені на рисунку 5 та в таблиці 2. Сумарна кількість витоку за 1412 с з однієї частини трубопроводу становить Q = 96120 кг, а виток за 90 с становить Q = 13857 кг.

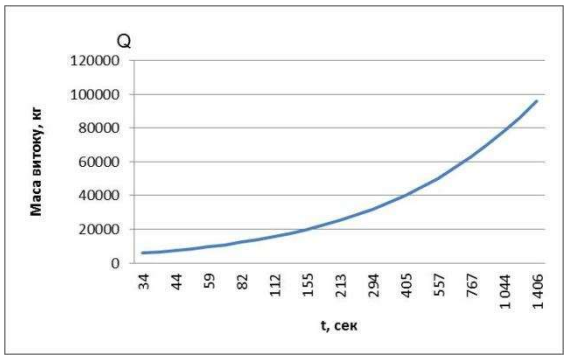


Рисунок 5 **–** Результати розрахунків для секції регіонального трубопроводу
Figure 5 – Calculation results for the regional pipeline section

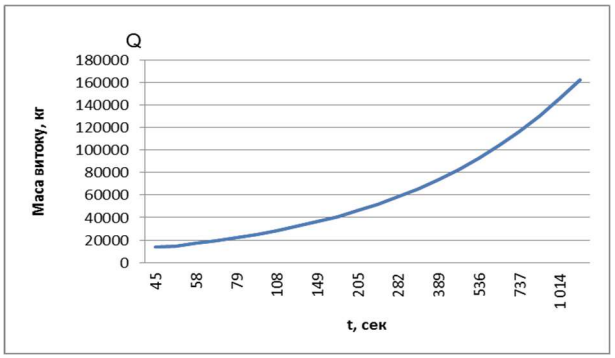


Рисунок 6 **–** Результати розрахунків витоку маси аміаку для секції магістрального трубопроводу
Figure 6 **–** Results of ammonia mass leakage calculations for the main pipeline section

Результати розрахунків витоку маси аміаку для секції магістрального трубопроводу d =0.34 м, Q_0 =168232 кг наведені на рисунку 6 та в таблиці 3. Кількість витоку за 1245 с з однієї частини трубопроводу становить Q = 168232 кг, виток за 90 с становить Q = 24993 кг. Ці результати вимагають уточнення через неточність визначення коефіцієнту тертя (тут прийнято f = 0.003).

Проведені розрахунки за наведеною вище методикою для зрідженого аміаку є попередніми та вимагають подальшої розробки програм та використання параметрів, особливо, стисливості газової суміші та коефіцієнту тертя, які є результатом спеціальних досліджень та, можливо, проведення експериментів [7, 8, 19].

Розрахунки за спрощеною методикою просторово - часового витікання зрідженого газу з трубопроводу

Загальний миттєвий обсяг рідини у непошкодженому трубопроводі рахуємо за вище наведеними формулами з допомогою функціональних таблиць (Excel).

Перший етап – напірний викид аміаку як рідини з трубопроводу внаслідок надлишкового тиску ΔP_s^n в ньому до повної зупинки насосів та закриття затворів.

Витікання аміаку з трубопроводу до повного закриття затворів згідно запропонованого сценарію зупинки витікання з сусідніх секцій виконуємо за :

$$q_s = C_d \times A_h \times \sqrt{(2P \times \rho_L)} \quad (44)$$

Розрахунок проводиться шляхом ітерацій та зупиняється при досягненні хвилі падіння тиску та фазового переходу зрідженого аміаку до затвору.

У заданій постановці обидві частини зруйнованої секції мають однакову довжину і є абсолютно ідентичні одна одній та витікають в одне місце. Тому всі параметри стосовно обсягів витікання зрідженого газу для отримання остаточних результатів збільшуються у 2 рази.

Таблиця 5 **–** Параметри розрахунку
Table 5 **–** Calculation parameters

t, c	dt, c	P, атм	dM,кг	β	dV, м^3	Mrest, кг	V rest, м^3	dPexces, атм	M esit, кг
0	0	35.00	0.00	0.7	0.00	170492.47	271.92	0.00	0
10	10	30.32	10808.66	0.2	17.24	159683.81	254.68	4.68	10808.66
30	20	22.13	20119.20	0.1	32.09	139564.62	222.59	8.19	30927.85
70	40	15.96	34379.40	0.1	54.83	105185.21	167.76	6.17	65307.26
130	60	12.36	43795.15	0.1	69.85	61390.06	97.91	3.60	109102.41
150	20	9.51	12846.67	0.1	20.49	48543.39	77.42	2.85	121949.08
180	30	7.66	16905.57	0.1	26.96	31637.83	50.46	1.86	138854.64
242	62	7.02	31346.06	0.1	33.00	291.77	17.46	0.64	170200.70

Обсяг зрідженого аміаку у половині зруйнованої секції $V_{rest,t=0}$ = 271.92 m^3 (магістральний АТП) згідно розрахунку ітераційним методом, що наведено у вигляді функціональної таблиці 2 та рис. 7 та 8, які свідчать, що випорожнення аварійної секції обсягом V=272 м^3 відбувається на протязі менше T=250 с. У заданій постановці обидві частини зруйнованої секції мають однакову довжину і є абсолютно ідентичні одна одній та витікають в одне місце (рис. 7). Тому всі параметри стосовно обсягів витікання зрідженого газу для отримання остаточних результатів збільшуються у 2 рази. Швидкість витікання з аварійної ділянки під напором P = 50 атм. Розрахунок проводиться покроково (dt = 10 с – 60 с) та припиняється при досягненні поверхні розділу рідини та двофазної суміші ділянки до затвору трубопроводу. Результати розрахунку показують, що витік газу, який знаходиться у зрідженому стані під дією надлишкового тиску в об‘ємі V= 272.9 м^3, відбувається на протязі менше 250 с. (табл. 5) Згідно термогідродинамічної теорії перетворення

зрідженого газу після аварійного розриву трубопроводу по типу гільйотинного розтину під великим надлишковим тиском рекомендується виконувати на ***Другому етапі*** утворення двох-фазової області (рис. 8 [8]), що також може бути розрахований за допомогою окремого програмного забезпечення та, можливо, з проведенням експериментальних досліджень.

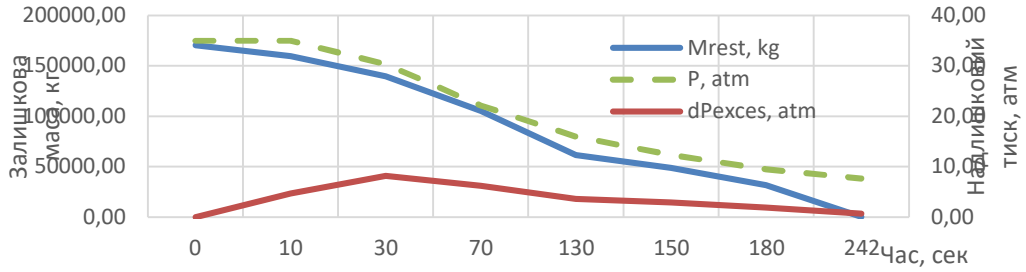


Рисунок 7 – Хід падіння надлишкового тиску та витоку залишкової маси зрідженого аміаку
Figure 7 – The course of excess pressure drop and leakage of residual mass of liquefied ammonia

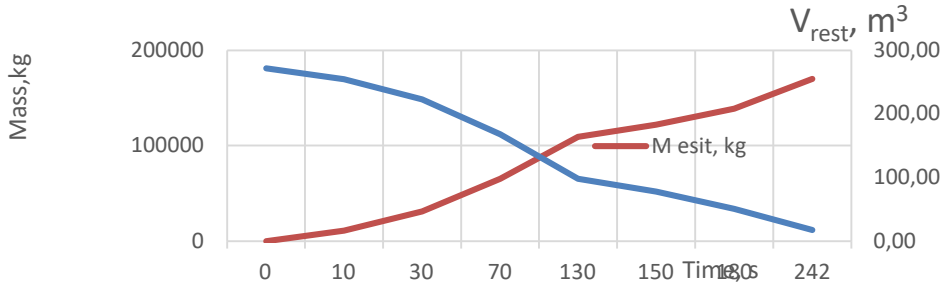


Рисунок 8 – Хід випорожнення половини зруйнованої секції
Figure 8 – The course of emptying half of the destroyed section

V= 272.9 м^3, відбувається на протязі менше 250 с. (табл. 5) Згідно термогідродинамічної теорії перетворення зрідженого газу після аварійного розриву трубопроводу по типу гільйотинного розтину під великим надлишковим тиском рекомендується виконувати на ***Другому етапі*** утворення двох-фазової області (рис. 8 [8]), що також може бути розрахований за допомогою окремого програмного забезпечення та, можливо, з проведенням експериментальних досліджень.

Третій етап – витікання газу аміаку, який утворився в результаті фазового переходу, з трубопроводу відбувається шляхом витіснення повітрям чи продувом до випорожнення аварійної секції обсягом 272 м^3 . Через те, що обидві частини зруйнованої секції мають однакову довжину і є абсолютно ідентичні одна одній та витікають в одне місце, тому всі параметри стосовно обсягів витікання зрідженого газу для отримання остаточних результатів збільшуються у 2 рази.

Отримані також результати розрахунку секції регіонального трубопроводу витоку газу, який знаходиться у зрідженому стані під дією надлишкового тиску в об‘ємі V= 155.792 м^3. На протязі T= 200 с відбувається фазовий перехід та витиснення рідкого аміаку у вигляді газово-парової суміші. Залишковий газ у секції витісняється повітрям чи шляхом продуву.

Оцінку швидкості витоку зрідженого газу з секцій трубопроводу меншої довжини можна отримати за результатами таблиць 2 та 4 відповідно для магістрального та регіонального аміакопроводу шляхом визначення обсягу маси M_0 (кг) рідини у трубі відповідної довжини зруйнованої секції (не обов‘язково посередині секції) та визначення по таблиці час T (с), який відповідає витоку $M_{exit}=M_0$. Наприклад, якщо маса аміаку у зруйнованій секції становить M_0=70000 кг, то термін витоку газу відповідно дорівнює T=130 с . Якщо маса аміаку у секції не збігається приблизно

з табличними значеннями $M_0 \neq M_{exit}$, то час визначається шляхом лінійної інтерполяції чи на побудованій графічній залежності.

Висновки. За результатами роботи, можна зробити наступні рекомендації та пропозиції:

– запропоновано методику із оцінювання ходу випорожнення зрідженого аміаку із зруйнованої секції магістрального аміакопроводу за методом гільйотинного розриву та ітераційної процедури на основі розробленої програми, яка надається в форматі Excel.

– результати розрахунку секції магістрального трубопроводу показують, що витік газу, який знаходиться у зрідженому стані під дією надлишкового тиску в об‘ємі V= 272.9 м^3, відбувається на протязі 250 с.

– оцінку швидкості витоку зрідженого газу з секцій трубопроводу меншої довжини можна отримати за результатами таблиць відповідно для магістрального чи регіонального аміакопроводу шляхом визначення обсягу маси M_0 (кг) рідини у трубі відповідної довжини зруйнованої секції (не обов‘язково посередині секції) та визначення по таблиці час Т (с), який відповідає витоку $M_{exit}=M_0$. У випадку більшої довжини трубопроводу таблиці 2 чи 4 необхідно перерахувати для відповідних параметрів обсягу довгого трубопроводу.

– остаточний об‘єм зрідженого газу, що знаходився в обох частинах секції, яка була зруйнована, становить V_0 = 545.8 м^3 та витікає на протязі 242 с у вигляді відповідного об‘єму газу $V_г$. До цього об‘єму згодом додається газ в такому саме обсязі, що витікає на другій стадії.

– аналогічні результати розрахунку секції регіонального трубопроводу показують, що витік газу, який знаходиться у зрідженому стані під дією надлишкового тиску в об‘ємі V= 155.792 м^3, відбувається на протязі 200 с.

– наведені результати є наближеними, тому вимагають перевірки за розрахунками по моделі фазового переходу та поширення зворотної хвилі розгерметизації, що вирішуються за моделями, які вимагають в подальшому розробки додаткового складного програмного забезпечення, більш об‘ємних розрахунків та, можливо, з проведенням експериментальних досліджень, особливо для визначення коефіцієнту тертя та стисливості газо-парової суміші під час фазового переходу та витоку з розривного отвору.

Перелік посилань

1. Звіт про науково-дослідну роботу «Надання рекомендацій з оцінки витоку маси рідини аміаку в трубопроводі з часом». Київ 2024. С.35.

2. Cleaver R.etAlt.2003 Modelling outflow from a ruptured pipeline transporting compressed volatile liquids – Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16 (2003) 533–543 www.elsevier.com/locate/jlp.

3. Амеліна Л. В. др. 2021 Моделювання забруднення довкілля в разі емісії аміаку з пошкодженого трубопроводу ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online) Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2021, № 1 (91) Екологія та промислова безпека doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/229167.

4. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. Науката прогрес транспорту. 2016. № 1 (61). P. 48–54. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2016/60953.

5.Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollutionfor Regions Having Complex Topography. NATO Science for Peace and Security. Series C : EnvironmentalSecurity. Dordrecht, 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15

6.Cao C., Li C., Yang Q., Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Alloca-tionfor Sustainable Disaster Supply Chain. Sustainability. 2017. Vol. 9. Iss. 11. P. 1–22.DOI: https://doi.org/10.3390/su9112103

7.Naserzadeh Z., Atabi F., Moattar F., Nejad N. M. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution bymathematical modeling. Bioscience Biotechnology Research Communication. 2017. Vol. 10. Iss. 1.P. 192–204.

8.Tumanov A., Gumenyuk V., Tumanov V. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. IOP Conf. Series : Earthand Environmental Science. 2017. Vol. 90. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027

9. Cumber P.S. Outflow from fractured pipelines transporting supercritical ethylene. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 20 (2007) 26–37.

METHOD OF ASSESSMENT OF LIQUID MASS LEAKAGE IN THE PIPELINE DURING OPERATION

Onyshchenko Artur M., Doctor of Technical Science, Professor, Head of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, National Transportation University Kyiv, Ukraine, e-mail: *onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, +380687771899, https://orcid.org/0000-0002-1040-4530* .

Ostroverkh Borys M., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-57; e-mail: borys.ostro@gmail.com.

Chyzhenko Nataliia P., PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures Department National Transportation University Kyiv, Ukraine, e-mail: *chyzhenko_np@ukr.net, +380507355080,* https://orcid.org/ 0000-0002-9152 2474.

Aksonov Sergii Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, Aksenov121@gmail.com, tel. +380971534406, https://orcid.org/0000-0002-6749-3909.

Moshkivskyi Roman V., postgraduate student of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine e-mail: moshkjoma@gmail.com, tel. +380672357174, https://orcid.org/0009-0004-9471-4238

Summary. During the development of the documents stipulated by the Law of Ukraine "On Objects of Increased Danger" there was a need to calculate the amount of ammonia that can take part in an emergency situation during an accident on the linear part of the ammonia pipeline. Regulatory documents provide for the consideration of the case of an emergency situation with a guillotine rupture of the pipeline. The total mass of the hazardous substance involved in the accident is calculated as the total mass contained in the linear part of the pipeline between two shut-off devices and the total mass that can be released during the time established to detect the leakage of the substance and implement the closure of the shut-off devices.

It is necessary to calculate the mass of ammonia that can be released in the forward and reverse direction during the time established to detect the leakage of the substance and implement the closing of the shut-off devices. The total mass of the hazardous substance after the accident of the section of the ammonia pipeline was determined as the total mass in the linear part of the pipeline between two shut-off devices, and the total mass that can be released during the time established to detect the leakage of the substance and implement the closure of the shut-off devices according to the guillotine gap scheme.

Keywords: ammonia pipeline accidents, guillotine rupture, thermohydrodynamic flow theory, hydraulic approximation.

References

1. Report on the research work “Providing recommendations for assessing the mass leakage of ammonia liquid in a pipeline over time”. Kyiv 2024. P.35.

2. Cleaver R.etAlt.2003 Modelling outflow from a ruptured pipeline transporting compressed volatile liquids – Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16 (2003) 533–543 www.elsevier.com/locate/jlp.

3. Amelina L. V. et al. 2021 Modeling of environmental pollution in the event of ammonia emission from a damaged pipeline ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online) Science and progress of

transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2021, No. 1 (91) Ecology and industrial safety doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/229167.

5.Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollutionfor Regions Having Complex Topography. NATO Science for Peace and Security. Series C : EnvironmentalSecurity. Dordrecht, 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15

6.Cao C., Li C., Yang Q., Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Alloca-tionfor Sustainable Disaster Supply Chain. Sustainability. 2017. Vol. 9. Iss. 11. P. 1–22.DOI: https://doi.org/10.3390/su9112103

7.Naserzadeh Z., Atabi F., Moattar F., Nejad N. M. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution bymathematical modeling. Bioscience Biotechnology Research Communication. 2017. Vol. 10. Iss. 1.P. 192–204.

8.Tumanov A., Gumenyuk V., Tumanov V. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. IOP Conf. Series : Earthand Environmental Science. 2017. Vol. 90. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027

9. Cumber P.S. Outflow from fractured pipelines transporting supercritical ethylene. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 20 (2007) 26–37.

УДК 624.21:625.745.1 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-330-339**
UDC 624.21:625.745.1

АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТИЛМЕТ АКРИЛАТНИХ КОМПОЗИЦІЙ ДЛЯ РЕМОНТУ ДЕФЕКТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ

RELEVANCE OF USING METHYL METHACRYLATE COMPOSITES FOR REPAIRING DEFECTIVE REINFORCED CONCRETE BRIDGE BEAMS UNDER SERVICE CONDITIONS



Риковцев Олексій Ігорович, *аспірант кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010*
e- mail: rykovtsevoleksii@gmail.com

http://orcid.org/0009-0001-1715-6058

Анотація. Робота присвячена обгрунтуванню актуальності використання метилметакрилатних композицій для відновлення несної здатності дефектних залізобетонних балок прогонових будов автодорожніх мостів в експлуатаційних умовах.

Метою роботи є визначення основних дефектів залізобетонних балок автодорожніх мостів в експлуатаційних умовах та обгрунтування рішення застосування метилметакрилатних композицій для відновлення їх несної здатності.

Об'єкт дослідження: дефектні залізобетонні балки прогонових будов мостів.

Результати проведених обстежень залізобетонних балок автодорожніх мостів в експлуатаційних умовах показали, що у багатьох випадках балки мають різного роду дефекти та пошкодження. Зустрічаються дефекти у вигляді руйнування захисного шару бетону, сколи бетону, викришування бетону на поверхні балок внаслідок дії негабаритних транспортних засобів, є випадки корозії арматури залізобетонних балок мостів. Ці дефекти призводять до втрати несної здатності балок мостів та зменшенню довговічності мостів.

Встановлено, що основною причиною утворення дефектів залізобетонних балок автодорожніх мостів є незадовільний стан систем водовідводу та гідроізоляції, а також результатом ударів негабаритного автомобільного транспорту.

Запропоновано застосування метилметакрилатних композицій для відновлення несної здатності дефектних залізобетонних балок мостів із використанням незнімної металевої опалубки.

Ключові слова: залізобетонні балки моста, автодорожні мости, метилметакрилатні композиції, незнімна опалубка, дефекти балок мостів.

Вступ. Автодорожні мости є критичними спорудами автомобільного транспорту. Від їх технічного стану залежить безперебійність перевезень. Однак в експлуатаційних умовах балки автодорожніх мостів зазнають різного роду дефектів та пошкоджень, які впливають на несну здатність автодорожніх мостів [1]. Вплив інтенсивних навантажень, перепади температури навколишнього середовища та вплив вологи поступово призводять до руйнування конструкцій автодорожніх мостів. Це проявляється у появі тріщин, сколів та деформацій балок, утворенню корозії арматури залізобетонних балок та зниженні несної здатності конструкцій мостів, що у кінцевому результаті впливає на обмеження їхньої експлуатаційної придатності та підвищенню ризику аварійних ситуацій конструкцій мостів.

Застосування традиційних методів заміни та ремонту дефектних балок автодорожніх мостів у більшості випадків є трудомістким та економічно дорогим рішеннями, які призводять до тривалих обмежень руху автомобільного транспорту. У багатьох випадках незадовільний технічний стан автодорожніх мостів спричинений моральним та фізичним зносом, а також вплив воєнних дій. У результаті чого значна частина мостів є зруйнованою, або має значні дефекти та пошкодження. Це викликає необхідність розробки нових перспективних методів ремонту та підсилення дефектних балок автодорожніх мостів. Перспективним методом ремонту дефектних залізобетонних балок мостів є застосування метилметакрилатних композицій [1, 2].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У праці [3] доведено, що зміна температури та вологи призводить до порушення гідрометричної рівноваги бетону із навколишнім середовищем. Це призводить до зміни напружено-деформованого стану конструкцій мостів, що у багатьох випадках викликає появу тріщин у балках прогонових будов мостів.

Одним із перспективних та сучасних методів відновлення несної здатності та довговічності залізобетонних балок мостів є застосування метилметакрилатних композицій. Полімери на основі метилметакрилату володіють високою адгезією до бетону, добре проникають у тріщини залізобетонних балок та володіють швидкими темпами твердіння [1, 2].

У праці [1] проведені дослідження температурного поля та напружень у залізобетонній балці моста підсиленої метилметакрилатними композиціями. При цьому розрахунок проведено із заданням різних товщин підсилення та модуля пружності метилметакрилату. Результати досліджень показали, що на контакті балки та конструктивного підсилення метилметакрилатом утворюється градієнт температури. Цей градієнт викликає напруження у контактних зонах конструкційних матеріалів.

У праці [2] наведено вигляд підсилених крайніх залізобетонних балок моста із використанням метилметакрилатних композицій. Також отримані результати розрахунків, за якими встановлено, що при появі градієнта додатних та від'ємних температур, виникають температурні напруження.

У роботі [4] наведено особливості застосування смоли на основі метилметакрилату (ММА) при ремонті тріщин у бетонних конструкціях. Зазначено, що смоли ММА швидко тверднуть і відзначаються високою адгезією, що робить їх ідеальним вибором для широкого спектра застосувань у сфері ремонту бетону та нанесення покриттів.

У праці [5] для заповнення стикових швів між плитами моста використовується полімербетон. Полімербетон, виготовлений із застосуванням поліметилметакрилату та стандартного заповнювача. Результати досліджень показали, що PMMA-PC забезпечує чудову можливість виготовлення відносно невеликого з'єднувального шва у порівнянні з усіма іншими альтернативними бетонними матеріалами. Результати випробувань PMMA-PC та приклад практичного проєктування показують, що PMMA-PC є відмінним альтернативним матеріалом для з'єднувальних швів плит мостового полотна, який дозволяє значно зменшити ширину зазору між збірними елементами у порівнянні з ультрависокоякісним бетоном (Ultra-High Performance Concrete, UHPC), що забезпечує як прямі, так і непрямі економічні вигоди. При цьому у роботі [6] проведені дослідження, щодо порівняння механічних властивостей PMMA-PC з UHPC для заповнення поздовжніх швів між балками мостового настилу. Результати досліджень показали, що PMMA-PC має подібні, або кращі характеристики міцності та зчеплення, що робить його перспективним матеріалом для таких застосувань.

У праці [7] зазначено, що основна причина появи полімерів у ремонтних матеріалах полягає у тому, що полімери володіють високою адгезією, що дозволяє добре зчепитися новому та старому бетону при ремонтах будівельних конструкцій. Також у роботі проведені дослідження залежності міцності при вигині та стиску полімерних матеріалів від вмісту наповнювача. Наведено результати із визначення оптимальної кількості наповнювача, а також розробка та застосування складу для ремонту штучних бетонних споруд.

У працях [8–9] узагальнено існуючі підходи застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах. Також запропоновано рекомендації, щодо улаштування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на мостах.

У праці [10] використання рециклінгових наповнювачів дозволило провести заповнення тріщини та раковини у бетонних конструкціях. Крім цього такі заповнювачі дозволяють створити захисний шар на бетоні для обмеження доступ агресивного середовища до споруди.

У праці [11] проведені дослідження ефективності застосування композицій на основі метилметакрилату. Для цього використано метод скінченних елементів. Встановлено, що полімер HMWM може проникати в тріщини шириною від 0,01 мм і більше, збільшуючи жорсткість та міцність бетонних конструкцій.

За результатами проведеного огляду науково-дослідних робіт, щодо використання метилметакрилату у транспортному будівництві встановлено, що технологія ремонту дефектних залізобетонних конструкцій мостів із використанням метилметакрилату дозволяє виконувати ремонти тріщин конструкцій без необхідності демонтажу конструкційних елементів. Це дозволить забезпечити важливу практичну складову при ремонтах дефектних залізобетонних балок мостів в умовах експлуатації.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є виявити основні дефекти залізобетонних балок автодорожніх мостів в експлуатаційних умовах та навести технологію застосування метилметакрилатних композицій при ремонті дефектних балок мостів. Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

– провести обстеження прогонових будов автодорожніх мостів;

– навести основні дефекти та пошкодження залізобетонних балок мостів в умовах експлуатації;

– запропонувати схему підсилення дефектних залізобетонних балок автодорожніх мостів із використанням метилметакрилатних композицій.

Матеріали та методика досліджень. Для визначення видів дефектів, пошкоджень та технічних характеристик автодорожніх мостів в експлуатаційних умовах проведено ряд обстежень їх технічного стану. Вигляд досліджуваного шляхопроводу в м. Києві наведено на рис. 1.



Рисунок 1 – Вид на фасад шляхопроводу

Figure 1 – View of the overpass facade

Шляхопровід однопрогоновий, з повною довжиною 49,8 м, за схемою 1х22,26 м, загальна ширина проїзної частини становить 28,0 м. Призначений для пропуска 6-ти смуг руху автомобільного транспорту та двох колій трамвайного руху.

Прогонова будова шляхопроводу складається із збірних залізобетонних балок з попередньо-напруженою арматурою. Повна довжина балок становить 22,16 м. Балки виготовлені за типовим проєктом вип. 122-63. Армування балок – 7 полігональних пучків з 24 дротин діаметром 5 мм з границею міцності 17000 кгс/см^2. Висота головних балок 1,2 м, ширина верхньої плити 1,62 м, товщина 8–12 см. У поперечному перерізі влаштовано 21 балка, що об’єднані між собою 6-ма діафрагмами.

Відстань в осях балок становить 1,66 м. Стики діафрагм зварні з металевими накладками по закладних деталях діафрагм та верхньої плити балок. Віддаль в осях діафрагм становить 4,31 м.

Опори шляхопроводу виконані у вигляді рамної конструкції типу «стрімка лань». З боку опори моста №1 балки обпираються на нерухомі металеві опорні частини тангенціального типу, з боку опори №2 – на металеві валкові опорні частини.

Прогонова будова шляхопроводу опирається на збірно-монолітні залізобетонні просторові рамні конструкції опор типу «стрімка лань» із каркасним армуванням.

Під час обстеження шляхопроводу виявлені конструкції з дефектами, які знижують їх несну здатність, довговічність та надійність. Вигляд дефектів балок прогонової будови моста наведено на рис. 2. На рис. 2, *a* наведено дефекти, які викликані процесами замоканням та вилуговуванням бетону балок та плити прогонової будови шляхопроводу.



a *b*

c *d*

Рисунок 2 – Дефекти балок прогонових будов шляхопроводу: *a* – замокання та вилуговування бетону балок та плити прогонової будови шляхопроводу; *b* – тріщини, сколи бетону з оголенням та корозією арматури балок; *c* – сколи бетону в результаті ударів транспортних засобів з оголенням та деформацією конструктивної арматури балок; *d* – тріщини, сколи бетону з оголенням та корозією арматури, руйнування консолей балок та карнизних блоків прогонової будови шляхопроводу

Figure 2 – Defects of the overpass span beams: *a* – moisture penetration and leaching of concrete in the beams and deck slab of the overpass span structure; *b* – cracks and concrete spalling with exposure and corrosion of the beam reinforcement; *c* – concrete spalling caused by vehicle impacts, leading to exposure and deformation of the structural reinforcement of the beams; *d* – cracks and concrete spalling with exposure and corrosion of the reinforcement, as well as damage to the beam cantilevers and cornice blocks of the overpass span structure

Також у процесі балки прогонової будови шляхопроводу мають дефекти у вигляді сколів та тріщин бетону з оголенням арматури балок (рис. 2, *b*). Бувають випадки сколів бетону, які виникають через ударні навантаження від рухомих транспортних одиниць (рис. 2, *c*) та окремо слід зазначити і дефекти консолей балок та карнизних блоків прогонової будови шляхопроводу (рис. 2, *d*).

На рис. 3 наведено дефекти рамних конструкцій, які бувають у вигляді тріщин, сколів бетону з оголенням та корозією арматури.

Результати обстежень показали, що прогонова будова містить дефекти та пошкодження, що характерні по всій її довжині. Причиною появи дефектів є незадовільний стан системи водовідводу та гідроізоляції, а також результатом ударів негабаритного автомобільного транспорту.



Рисунок 3 – Тріщини, сколи бетону з оголенням
та корозією арматури рамної конструкції шляхопроводу

Figure 3 – Cracks and concrete spalling with exposure
and corrosion of the reinforcement in the frame structure of the overpass

Із проведених досліджень встановлено, що основними дефектами прогонової будови шляхопроводу є:

-замокання та вилуговування бетону по плиті усіх балок прогону;

-замокання та вилуговування бетону діафрагм балок прогону;

-сколи бетону від ударів автомобільного транспорту з оголенням та корозією конструктивної арматури;

-вилуговування та сколи бетону, оголення та корозія арматури в результаті протікання води через плиту в зоні тротуарів та деформаційних швів;

-руйнування захисного шару бетону, оголення та корозія конструктивної арматури балок прогонових будов;

-руйнування захисного шару бетону та корозія попередньо-напруженої арматури балок Б1, Б2, Б3, Б19, Б20, Б21;

-руйнування консольної ділянки плити балки Б1;

-поздовжні тріщини вздовж робочої арматури балок прогонових будов;

-тріщини у діафрагмових з'єднаннях балок між Б1-Б2, Б2-Б3, Б3-Б4, Б18-Б19, Б19-Б20, Б20-Б21.

Окремо слід виділити балки прогонових будов із пошкодженнями захисного шару бетону та корозією попередньо-напруженої арматури.

Міцність бетону конструкцій визначали в місцях з відсутніми дефектами. Визначення міцності бетону виконувалось неруйнівним методом пружного відскоку згідно з ДСТУ Б В.2.7-220 [12]. При дослідженнях використано склерометр вимірювач міцності ОНИКС-2.6.

Для побудови градуювальної залежності «міцність бетону–показ відскоку склерометру» використано прилад методу відриву зі сколюванням ОНИКС-1.ОС.100 з допустимою основною відносною похибкою при вимірюванні навантаження ±2 %, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-220 [12]. Міцність бетону конструкцій визначали в місцях з відсутніми дефектами. Результати досліджень показали, що міцність бетону коливалася у межах від R=46,94 МПа до R=50,53 МПа, що відповідає класу за міцністю В35.

Проведені тести на глибину карбонізації бетону в зонах захисних шарів напруженої арматури балок прогонової будови показали, що глибина карбонізації бетону в місцях розташування попередньо-напруженої арматури не перевищує 13 мм. Проведені тести на глибину карбонізації бетону в зонах захисних шарів арматури рамних конструкцій опор показали, що глибина карбонізації бетону балок БО сягає 15 мм, а стійок СК2 – до 10 мм.

Проведені дослідження із визначення вмісту хлоридів в бетоні конструкцій прогонових будов та опор шляхопроводу. Відповідно до ДСТУ Б.В.2.6-145:2010 [13] максимально-допустимий вміст хлоридів в бетоні конструкцій не має перевищувати: для конструкцій, які містять попередньо напружену арматуру 0,1 % від маси цементу, для конструкцій із ненапруженою арматурою не більше 0,4 % від маси цементу, для неармованих конструкцій не більше 1,0 % від маси цементу.

Для визначення вмісту хлоридів у бетоні конструкцій прогонових будов та опор шляхопроводу, із конструкцій вибурювали керни діаметром 50 мм і глибиною до 80 мм. Місця відбору проб вибрано на конструкціях де наявні дефекти корозійного походження для встановлення природи їх походження. У лабораторних умовах із кожного керна на глибині 2 см від поверхні і 5 см від поверхні випилювали по 2 циліндри висотою 1 см. Бетонні циліндри подрібнювали, відділяли щебінь і металеві включення, після чого отриманий цементний камінь розмелювали до проходження проби через сітку № 008. З отриманих проб, в спеціалізованій атестованій хімічній лабораторії, методом титрування азотнокислим сріблом, визначали вміст водорозчинних хлоридів. Масова частка хлоридів від маси цементу в бетоні зразків перераховувалась з припущення, що водоцементне відношення бетону конструкцій становить В/Ц=0,4.

За результатами досліджень встановлено, що масова частка хлоридів від маси цементу в бетоні конструкцій шляхопроводу становить: балка Б1 – 0,25÷0,4 %; балка Б2 – 0,05 %; балка Б3 – 0,55 %; балка Б11 – 0,05 %; балка Б13 – 0,01÷0,03 %; балка Б19 – 0,05 %; балка Б20 – 0,05÷0,4 % та балка Б21 – 0,06÷0,65 %.

Згідно результатів досліджень масова частка хлоридів від маси цементу в бетоні балок прогонової будови шляхопроводу із попередньо напруженою арматурою перевищує 0,1 % в конструкціях балок Б1, Б3, Б20, Б21. Перевищення допустимого рівня масової частки хлоридів від маси цементу в бетоні конструкцій знайдено в місцях із наявним руйнуванням захисного шару бетону та корозією арматури. Це свідчить про те, що основним фактором появи дефектів в цих конструкціях є наявність в бетоні хлоридів на глибині, яка перевищує товщину захисного шару бетону. Технічний стан шляхопроводу оцінюється за ДСТУ 9181 [14].

Пропозиції по підвищенню несучої здатності дефектних балок прогонових будов шляхопроводу. Для підвищення несучої здатності дефектних залізобетонних балок шляхопроводу запропоновано використання методу підсилення балок шляхопроводу із використанням технології незнімної опалубки [1–2]. Для цього використовується незнімна металева опалубка, пісок та метилметакрилатна композиція. Конструктивна схема підсилення дефектної залізобетонної балки моста наведена на рис. 4.

При застосуванні метилметакрилатних композицій монтується незнімна металева опалубка, яка кріпиться до балки прогонової будови моста. Незнімна опалубка влаштовується на відстані 20 мм від низу балки для утворення порожнини в яку засипається дрібний пісок. У пісок добавляється метилметакрилатна композиція. Вона проникає у тріщини залізобетонної балки. Завдяки хорошій текучості та адгезії відбувається заповнення порожнин і тріщини у залізобетонній балці, міцне їх з'єднання, що сприяє підсиленню дефектної балки.

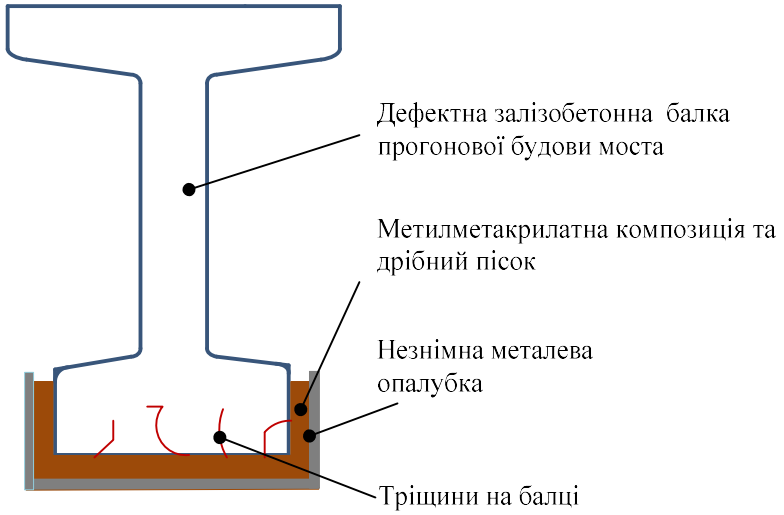


Рисунок 4 – Методика підвищення несучої здатності дефектних залізобетонних балок прогонових будов шляхопроводу шляхом застосування метилметакрилатних композицій

Figure 4 – Method for increasing the load-bearing capacity of defective reinforced concrete beams of bridge superstructures by using methyl methacrylate compositions

Висновки. За результатами проведених досліджень дефектів залізобетонних балок автодорожніх мостів в експлуатаційних умовах та наведеної технології ремонту дефектних балок мостів із використанням метилметакрилатних композицій отримано такі висновки та рекомендації:

1. Результати обстежень залізобетонних балок шляхопроводу показали, що в експлуатаційних умовах балки отримують ряд дефектів та пошкоджень. Характерними дефектами є тріщини, сколи бетону захисного шару, оголення та корозія арматури, пошкодження балок великогабаритним транспортом тощо.

2. Застосування технології ремонту дефектних залізобетонних балок автодорожніх мостів із використанням метилметакрилатних композицій дозволить підвищити несну здатність та подовжити термін служби існуючих конструкцій мостів. Також це забезпечить зниження економічних витрат на капітальні ремонти та заміну конструкцій на мості, і забезпечить мінімізацію простоїв транспорту під час ремонтних робіт.

Перелік посилань

1. Kovalchuk, V., Sobolevska, Yu., Onyshchenko, A., Fedorenko, O., Tokin, O., Pavliv, A., Kravets, I., Lesiv J. (2021) Procedure for determining the thermoelastic state of a reinforced concrete bridge beam strengthened with methyl methacrylate. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov. – 4/7 (112), 2021. – pp. 26–33. doi: 10.15587/1729-4061.2021.238440.

2. Риковцев О. І., Ковальчук В. В. Термонапружений стан залізобетонних балок мостів підсилених метилметакрилатними композиціями // Сучасні транспортні технології: матеріали 16-ї Міжнародної науково-практичної конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірпи, 21 листопада 2024 р., Львів. – 2024. – С. 66–67.

3. Yan, Yihang & Wu, Dingjun & Li, Q.. (2018). A three-dimensional method for the simulation of temperature fields induced by solar radiation. Advances in Structural Engineering. 22. 136943321879525. 10.1177/1369433218795254. https://www.researchgate.net/publication/327272459_A_three-dimensional_method_for_the_simulation_of_temperature_fields_induced_by_solar_radiation.

4. MMA Resins: Versatile Solutions for Concrete Repair and Coating. Електронний ресур. Адреса посилання: https://duraamen.com/blog/mma-resins-versatile-solutions-for-concrete-repair-and-coating/?srsltid=AfmBOoqokgSxQr_x53AP1a9SP0Es2K7HTO8BiX32FPar6g3L5MawD2R_&utm_source=chatgpt.com.

5. Mantawy, I., Chennareddy, R., Genedy, M., & Taha, M. R. (2019). Polymer concrete for bridge deck closure joints in accelerated bridge construction. Infrastructures, 4(2), 31. https://doi.org/10.3390/infrastructures4020031.

6. Abokifa, M., & Moustafa, M. A. (2021). Experimental behavior of poly methyl methacrylate polymer concrete for bridge deck bulb tee girders longitudinal field joints. Construction and Building Materials, 270, Article 121840. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121840.

7. Трикоз, Л. В., & Зінченко, О. С. (2025). Розробка полімерних наповнених композицій для ремонту штучних споруд залізничного транспорту. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, (27), 53–61. https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333792.

8. Онищенко, А. М., Гаркуша, М. В., Федоренко, О. В., & Гаркуша, І. Ю. (2024). Застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах. Мости та ту-нелі: теорія, дослідження, практика, 25, 74-86.

9. Р В.2.3-37641918-934:2023 (2023). Рекомендації з улаштування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах. Київ: ДП «УкрНДНЦ».

10. Трикоз, Л. В., Зінченко, О. С., & Никитинський, А. В. (2024). Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. Науковий вісник будівництва, 111, 72-79.

11. Ji, K., Yeon, J. H., Min, S. H., & Yeon, K.-S. (2021). Finite element model of concrete repaired by High Molecular Weight Methacrylate (HMWM) and its structural performance. Engineering Structures, 243, 112763. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112763.

12. ДСТУ Б В.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю.

13. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 31384-2008, NEQ)

14. ДСТУ 9181:2022. Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF CEMENT STONE CORROSION IN THE EMERGENCY DESTRUCTION OF THE DECK STRUCTURE OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE

Rykovtsev Oleksii I., Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-mail: rykovtsevoleksii@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-1715-6058

Summary. The work is devoted to substantiating the relevance of using methyl methacrylate compositions to restore the load-bearing capacity of defective reinforced concrete beams of highway bridge superstructures under operational conditions.

The aim of the study is to identify the main defects of reinforced concrete beams of highway bridges under service conditions and to justify the use of methyl methacrylate compositions for restoring their load-bearing capacity.

Object of research: defective reinforced concrete beams of bridge superstructures.

The results of inspections of reinforced concrete beams of highway bridges under operational conditions have shown that in many cases, the beams have various types of defects and damages. Defects such as the destruction of the protective concrete layer, chipping, and spalling of concrete on the beam surfaces due to the impact of oversized vehicles are observed, as well as cases of reinforcement corrosion in bridge beams. These defects lead to a loss of the beams' load-bearing capacity and a reduction in the service life of bridges.

It has been established that the main causes of defects in reinforced concrete beams of highway bridges are the unsatisfactory condition of drainage and waterproofing systems, as well as the impact of oversized road vehicles.

The application of methyl methacrylate compositions for restoring the load-bearing capacity of defective reinforced concrete bridge beams using permanent metal formwork has been proposed.

Keywords: reinforced concrete bridge beams, highway bridges, methyl methacrylate compositions, permanent formwork, beam defects.

References

1. Kovalchuk, V., Sobolevska, Yu., Onyshchenko, A., Fedorenko, O., Tokin, O., Pavliv, A., Kravets, I., Lesiv J. (2021) Procedure for determining the thermoelastic state of a reinforced concrete bridge beam strengthened with methyl methacrylate. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov. – 4/7 (112), 2021. – pp. 26–33. doi: 10.15587/1729-4061.2021.238440.

2. Rykovtsev O. I., Kovalchuk V. V. Termonapruzhenyi stan zalizobetonnykh balok mostiv pidsylenykh metylmetakrylatnymy kompozytsiiamy // Suchasni transportni tekhnolohii: materialy 16-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv i molodykh vchenykh imeni Heorhiia Kirpy, 21 lystopada 2024 r., Lviv. – 2024. – C. 66–67.

3. Yan, Yihang & Wu, Dingjun & Li, Q.. (2018). A three-dimensional method for the simulation of temperature fields induced by solar radiation. Advances in Structural Engineering. 22. 136943321879525. 10.1177/1369433218795254. https://www.researchgate.net/publication/327272459_A_three-dimensional_method_for_the_simulation_of_temperature_fields_induced_by_solar_radiation.

4. MMA Resins: Versatile Solutions for Concrete Repair and Coating. Електронний ресур. Адреса посилання: https://duraamen.com/blog/mma-resins-versatile-solutions-for-concrete-repair-and-coating/?srsltid=AfmBOoqokgSxQr_x53AP1a9SP0Es2K7HTO8BiX32FPar6g3L5MawD2R_&utm_source=chatgpt.com.

5. Mantawy, I., Chennareddy, R., Genedy, M., & Taha, M. R. (2019). Polymer concrete for bridge deck closure joints in accelerated bridge construction. Infrastructures, 4(2), 31. https://doi.org/10.3390/infrastructures4020031.

6. Abokifa, M., & Moustafa, M. A. (2021). Experimental behavior of poly methyl methacrylate polymer concrete for bridge deck bulb tee girders longitudinal field joints. Construction and Building Materials, 270, Article 121840. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121840.

7. Trykoz, L. V., & Zinchenko, O. S. (2025). Rozrobka polimernykh napovnenykh kompozytsii dlia remontu shtuchnykh sporud zaliznychnoho transportu. Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, (27), 53–61. https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333792.

8. Onyshchenko, A. M., Harkusha, M. V., Fedorenko, O. V., & Harkusha, I. Yu. (2024). Zastosuvannia hidroizoliatsiinykh system na osnovi metylmetakrylatnoi smoly na transportnykh sporudakh. Mosty ta tu-neli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, 25, 74–86.

9. R V.2.3-37641918-934:2023 (2023). Rekomendatsii z ulashtuvannia hidroizoliatsiinykh system na osnovi metylmetakrylatnoi smoly na transportnykh sporudakh. Kyiv: DP «UkrNDNTs».

10. Trykoz, L. V., Zinchenko, O. S., & Nykytynskyi, A. V. (2024). Vyznachennia mitsnisnykh ta strukturnykh kharakterystyk tsementno-pishchanykh rozchyniv z vykorystanniam retsyklinhovykh napovniuvachiv. Naukovyi visnyk budivnytstva, 111, 72-79.

11. Ji, K., Yeon, J. H., Min, S. H., & Yeon, K.-S. (2021). Finite element model of concrete repaired by High Molecular Weight Methacrylate (HMWM) and its structural performance. Engineering Structures, 243, 112763. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112763.

12. DSTU B V.2.7-220:2009. Budivelni materialy. Betony. Vyznachennia mitsnosti mekhanichnymy metodamy neruinivnoho kontroliu.

13. DSTU B V.2.6-145:2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruktsii vid korozii. Zahalni tekhnichni vymohy (HOST 31384-2008, NEQ).

14. DSTU 9181:2022. Nastanova z otsiniuvannia ta prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv.

УДК 621. 396 : 621.37 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-340-351**
UDC 621. 396 : 621.37

ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРРЕГЕНЕРАТИВНИХ ПРИЙМАЧІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ОТОЧУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА

APPLICATION OF SUPERREGENERATIVE RECEIVERS IN ENVIRONMENTAL STUDIES (MONITORING)



Артеменко Владислав Андрійович, *магістр екології, e- mail: ut5udj@ukr.net, тел. 380936011250, Україна, м. Київ.*

https://orcid.org/0000-0003-0536-5415



Петрович Володимир Васильович, *кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, тел. +380442807338, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 138.,*

https://orcid.org/0000-0003-0422-2535

Анотація. Складена нелінійна модель, що описує роботу суперрегенератора із зовнішним гасінням.

З метою встановлення зв'язку між явищами суперрегенерації та детермінованим хаосом використані глобальні та локальні показники Ляпунова.

Класично прийнято про наявність або відсутність детермінованого хаосу в системі робити висновок за знаком старшого глобального показника Ляпунова.

Величина старшого глобального показника λ_1 при роботі суперрегенератора завжди мати від'ємну величину, що свідчить про відсутність детермінованого хаоса при реалізації суперрегенеративного режиму. Зазначимо, що величина старшого локального показника Ляпунова λ_1(Local) при роботі на дуже короткі проміжки часу може приймати позитивні значення, що свідчать "спалахи" локального хаосу.

Тобто існує "глибинний" звязок суперрегенерації із детермінованим хаосом.

При проведенні дослідження також встановлено, що при лінійному та нелінійному режимах роботи суперрегенератора спостерігається значна відмінність за величиною значень головного глобального показника Ляпунова λ_1. Це дозволяє чітко розрізняти ці режими.

Мета роботи. Досконале дослідження проявів детермінованого хаосу при реалізації роботи суперрегенератора із зовнішним гасінням (як при лінійному, так і нелінійному режимах).

Ключові слова: оточуюче середовище, моніторинг, суперрегенеративні приймачі, показники Ляпунова, режими роботи суперрегенератора .

Ми думали, що нам потрібна інформація,
але насправді нам потрібні знання.
Нейт Сільвер. "Сигнал та шум: Чому
одні прогнози збуваються, а другі ні."
Переклад з англ.

Вступ

Один із методів моніторингу оточуючого середовища, розробці якого за останній час приділяється підвищена увага, заснований на оцінці взаємодії слабкого електромагнітного випромінювання із цим середовищем. Будь-яке середовище реагує появою відклику на певне випромінювання. При цьому у якості детекторів використовують різноманітні конструкції приймачів, у тому числі приймачів суперрегенеративних. Такі приймачі, як відомо, дуже прості за схемою, мають мініатюрні розміри. Крім того, демонструють значне число різних режимів своєї роботи.

Суперрегенератори володіють достатньо високою чутливістю при непоганій селективності, яку можливо покращувати вибором відповідного режиму роботи. Суперрегенеративні приймачі також дозволяють обробляти сигнали з різними типами модуляції, що взагалі не є притаманним для інших видів відповідного обладнання.

Класичні схеми суперрегенераторів звичайно розроблені на основі генераторів періодичних коливань із переривчастою генерацією. При цьому навіть відомі схеми мають специфічні властивості, які певною мірою залишаються не дослідженими і до теперішнього часу.

Нелінійна модель суперрегенератора

На рис. 1 приведена модель (схема) такого суперрегенератора. Схема нелінійна за рахунок використання негатрона N∅1.

При цьому амплітуда коливань може зростати реально тільки до кінцевої (та відносно невеликої) величини.

Розглянемо систему звичайних диференціальних рівнянь, що описує цю схему.

Для контура $N∅1/C∅1$ маємо

$$UN∅1+UC∅1=∅, \quad (1)$$
$$UN∅1=-UC∅1, \quad (2)$$
$$IN∅1=\psi(UN∅1). \quad (3)$$

Для контура $C∅1/L∅1/E∅1$ маємо відповідно

$$E∅1=-UC∅1+UL∅1, \quad (4)$$
$$UL∅1=UC∅1+E∅1, \quad (5)$$
$$L∅1\cdot\frac{dIL∅1}{dt}=UC∅1+E∅1. \quad (6)$$

Для контура $C∅1/R∅1$

$$-UC∅1+UR∅1=∅, \quad (7)$$

$$UR∅1=UC∅1, \quad (8)$$

$$IR\emptyset 1 = \frac{UR\emptyset 1}{R\emptyset 1} = \frac{UC\emptyset 1}{R\emptyset 1}, \quad (9)$$

Тобто остаточно

$$IR\emptyset 1 = \frac{UC\emptyset 1}{R\emptyset 1} \quad (10)$$

Для вузла 2

$$IN\emptyset 1 - IC\emptyset 1 - IL\emptyset 1 - IR\emptyset 1 = \emptyset, \quad (11)$$

$$IC\emptyset 1 = -IL\emptyset 1 - IR\emptyset 1 + IN\emptyset 1, \quad (12)$$

$$C\emptyset 1 \cdot \frac{dUC\emptyset 1}{dt} = -L\emptyset 1 - IR\emptyset 1 + IN\emptyset 1. \quad (13)$$

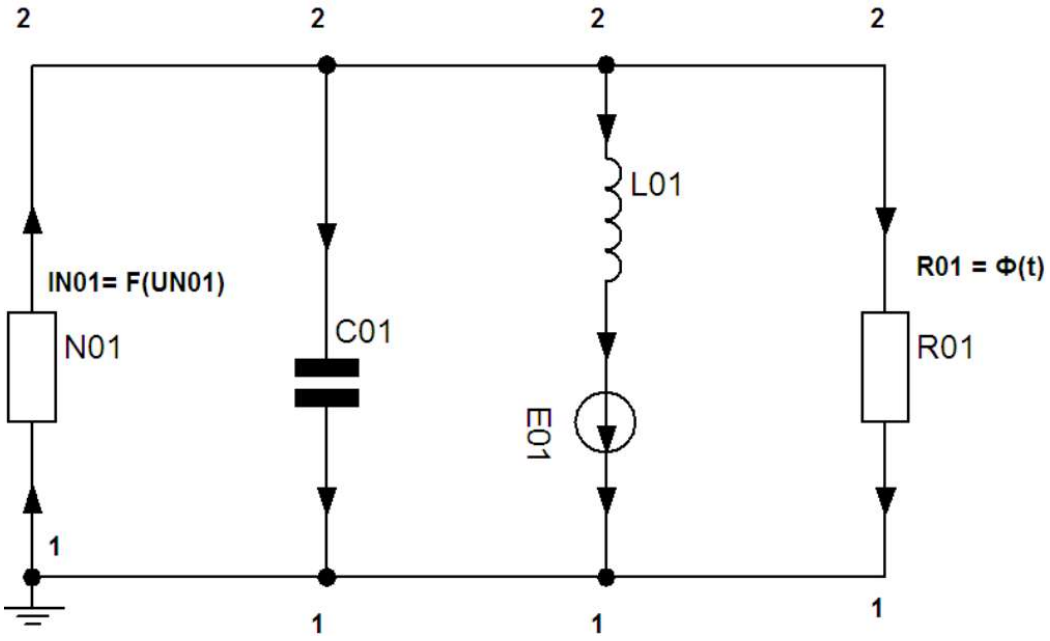


Рисунок 1 – Нелінійна модель суперрегенератора
Figure 1 – Nonlinear model of a superregenerator

Вольт-амперна характеристика негатрона NØ1

BAX негатрона може описувати поліном третього ступеня, де *X* - напруга (у вольтах), Y - струм (у амперах):

$$Y = \frac{1}{3} \cdot x^3 - \frac{4}{3} \cdot x = \frac{1}{3} \cdot x(x-2) \cdot (x+2).$$

В термінах *BAX* негатрона *N*Ø1 маємо $IN\emptyset 1 = \psi(UN\emptyset 1) = UN\emptyset 1 \cdot (UN\emptyset 1 - 2) \cdot (UN\emptyset 1 + 2)/3$.

Відповідний графік *BAX* приведений на рис.2.

Закон зміни опору $R\emptyset 1(t)$.

Далі визначимо закон зміни опору залежно від часу (t). Задача була вирішена проведенням відповідних числових експериментів беспосередньо із моделлю.

Числові експерименти показали, що достатньо добрі результати були досягнуті при значеннях $R\emptyset 1 Mean = {}^{7}/_{10}$ та $R\emptyset 1 Delta = {}^{1}/_{10}$.

Остаточно закон зміни величини $R\emptyset 1$ має вид

$$R\emptyset 1 = R\emptyset 1 Mean + R\emptyset 1 Delta \cdot Sin\left(W \cdot {}^{t}/_{k}\right),$$

де W - власна частота LC - контура.

Зважаючи, що у даному випадку $C\emptyset 1 = 1$ та $L\emptyset 1 = 1$, тому маємо $W = 1$.

Зазначимо, що напруга подається із частотою суперизації (частотою гасіння).

При цьому опір $R\emptyset 1$ можливо включати як послідовно з $L\emptyset 1$, так і паралельно. У даному випадку найкращі результати досягаються при паралельному включенні.

При натурній реалізації схеми опір $R\emptyset 1$ - окрема схема, виконана на польових транзисторах.

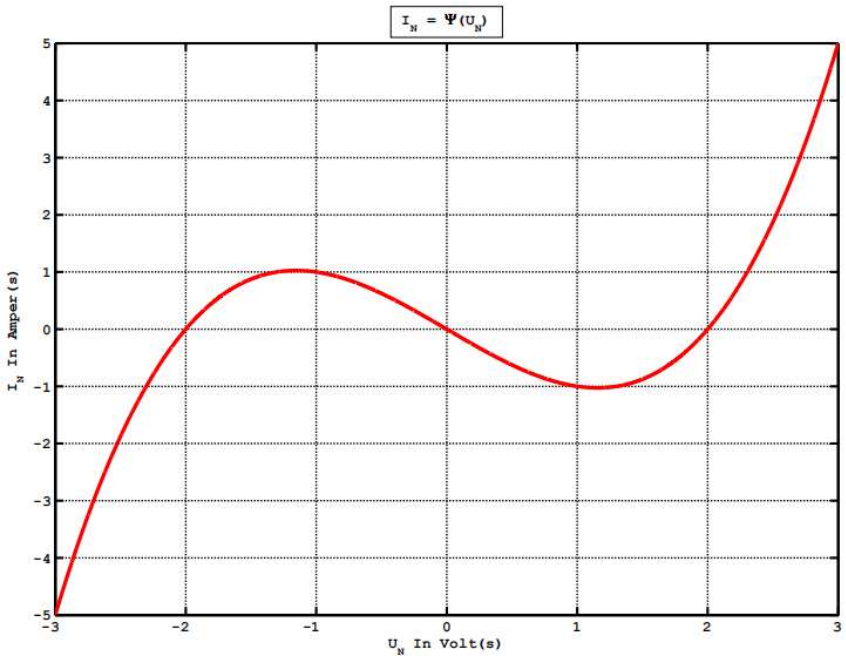


Рисунок 2 **–** Вольт-амперна характеристика негатрона, який був використаний в моделі суперрегенератора

Figure 2 **–** Volt-ampere characteristic of the negatron which was used in the superregenerator model

Суперрегенерація та хаос у динамічній системі.

При проведенні дослідження поведінки моделі суперрегенератора було б цілком достатньо знайти рішення для відповідної системи диференціальних рівнянь, наведених вище.

Але у XX-му сторіччі було відкрито та надалі мало широке практичне застосування положення детермінованого хаоса, що значно розширило рамки уявлень про природу багатьох явищ.

Як відомо, найбільш простий підхід для визначення детермінованого хаоса - це аналіз значень показників Ляпунова для даної динамічної системи.

Вважається, що у системі хаос присутній при наявності навіть одного глобального позитивного показника .

Зазначимо, що у відповідній науковій літературі були спроби висвітлення цього питання, але адекватного тлумачення вони не мали.

При проведенні дослідження необхідного було перш за все систему диференціальних рівнянь (6) та (13) представити як систему рівнянь автономних, а також визначити у аналітичному виді матрицю Якобі для такої системи.

Очевидно, що при зміні виду *BAX* негатрона відповідні елементи матриці Якобі також будуть змінюватись.

Дослідження проводили за допомогою аналітично-числового QR - методу.

Приймемо, що

$$E\emptyset 1 = E\emptyset 1Max \cdot Sin(w \cdot t),$$
$$E\emptyset 1Max = 1E\text{-}6$$

Тоді, враховуючи наведені вище вирази, маємо

$$UN\emptyset 1 = -UC\emptyset 1,$$
$$IN\emptyset 1 = \psi(UN\emptyset 1)$$
$$R\emptyset 1 = R\emptyset 1Mean + R\emptyset 1Delta \cdot Sin\left(W \cdot t/_k\right),$$
$$IR\emptyset 1 = \frac{UC\emptyset 1}{R\emptyset 1}, \; E\emptyset 1 = E\emptyset 1Max \cdot Sin(w \cdot t),$$
$$C\emptyset 1 \cdot \frac{dUC\emptyset 1}{dt} = -IL\emptyset 1 - IR\emptyset 1 + IN\emptyset 1.$$

Та

$$L\emptyset 1 \cdot \frac{dIL\emptyset 1}{dt} = UC\emptyset 1 + E\emptyset 1.$$

Позначимо $w \cdot t = z$.

Відповідно $\frac{dz}{dt} = \frac{d(w \cdot t)}{dt} = w$.

Тобто у систему диференціальних рівнянь слід додати ще рівняння виду $\frac{dz}{dt} = w$.

Таким чином, можливо одержувати автономну систему звичайних диференціальних рівнянь (ДР), де час у явному виді вже не фігурує.

Як з`ясувалось, в процесі експериментів одержували один і той же спектр.

Величина старшого глобального показника Ляпунова при цьому мала постійну та негативну величину $\lambda_1(t)$, тобто величину "локального" старшого показника.

Із цього витікає важливий висновок, що детермінований хаос у суперрегенераторі із зовнішним гасінням відсутній.

Можливо навіть припустити, що величина старшого глобального показника визначається перш за все значеннями, які приймають $R\emptyset 1$.

Деякі результати дослідження

На рис. 3 приведений результат дослідження роботи суперрегенератора при значенні К=10.

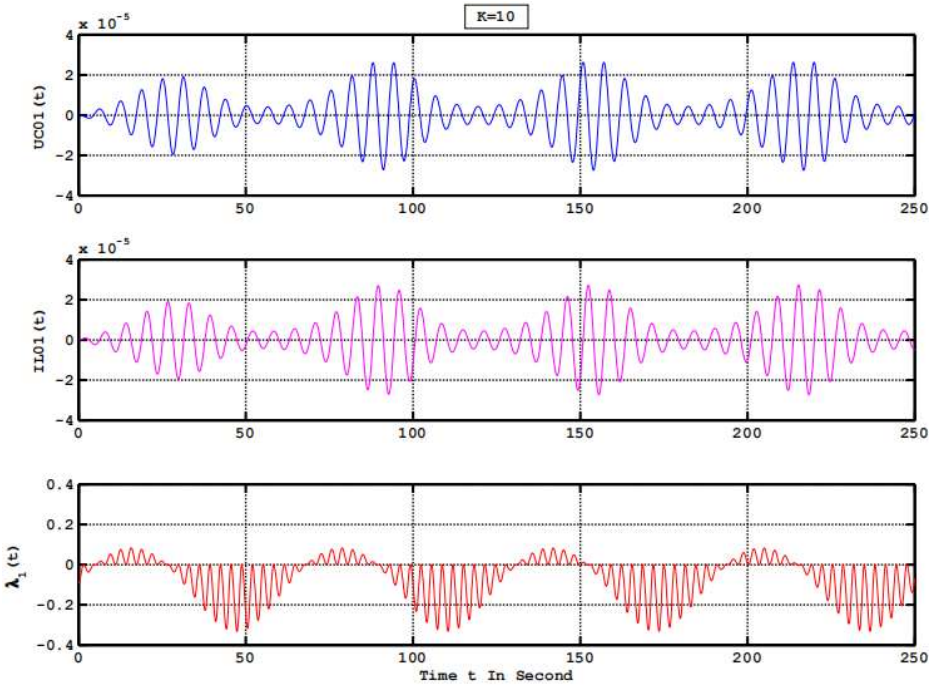


Рисунок 3 – Результати дослідження суперрегенератора при значенні K=1∅

Figure 3 – Results of the superregenerator studies with K=1∅

Зрозуміло, що у даному випадку суперрегенератор працює виключно у когерентному режимі, оскільки частота гасіння велика. Підсилення слабкого вхідного сигналу практично не спостерігається (у порівнянні із тим, що має місце при "розвинутій суперрегенерації").

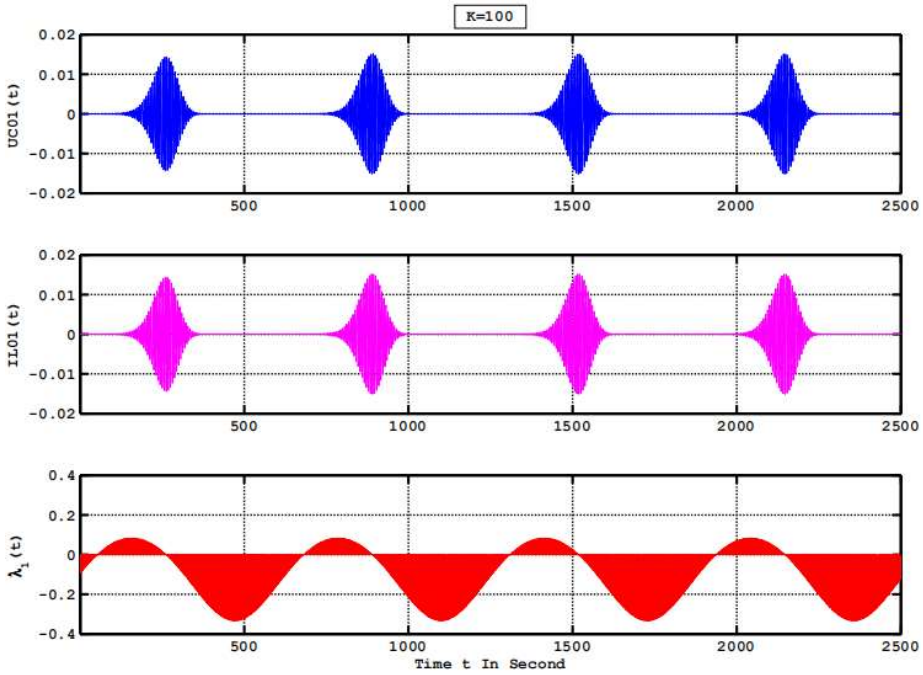
Локальний показник Ляпунова $\lambda_1(t)$ у окремі, невеликі проміжку часу, може приймати навіть позитивні значення. Це стосується переважно моментів із самого початку зростання "спалахів" суперрегенерації.

При значенні К=25 когерентний режим ще зберігається, але при К=50 спостерігаємо вже певний перехід від когерентного режиму роботи до некогерентного.

Приблизно при значенні К=100 маємо початок роботи у некогерантному лінійному режимі (рис. 4).

При К=150 – тенденція певного насичення, перехід до нелінійного режиму роботи суперрегенератора (дивись рис. 5).

На рис. 6 подано графік при нелінійному режимі. При цьому перехід від лінійного режиму роботи до нелінійного режиму при збільшенні значення параметру К відбувається поступово, достатньо повільним чином. Також при збільшенні значення параметру К, як було зазначено вище, маємо зменшення частоти гасіння.



Р***исунок 4*** **−** Результати дослідження суперрегенератора при значенні $K = 1\emptyset\emptyset$

Figure 4 **−** Results of the superregenerator studies with $K = 1\emptyset\emptyset$

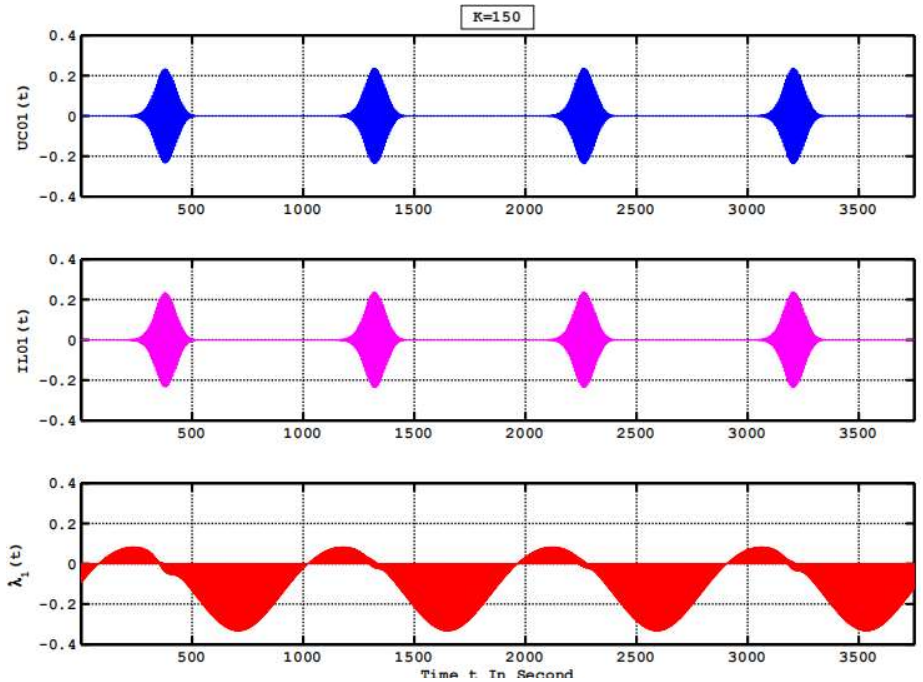


Рисунок 5 **−** Результати дослідження суперрегенератора при значенні $K = 15\emptyset$

Figure 5 **−** Results of the superregenerator studies with $K = 15\emptyset$

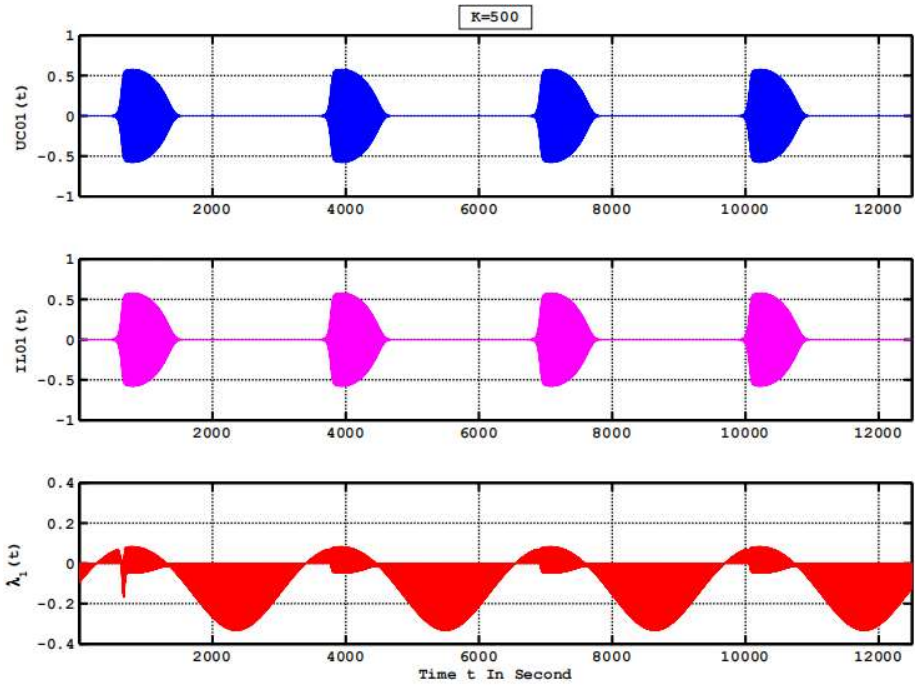


Рисунок 6 – Результати дослідження суперрегенератора при значенні $K = 5\emptyset\emptyset$

Figure 6 – Results of the superregenerator studies with $K = 5\emptyset\emptyset$

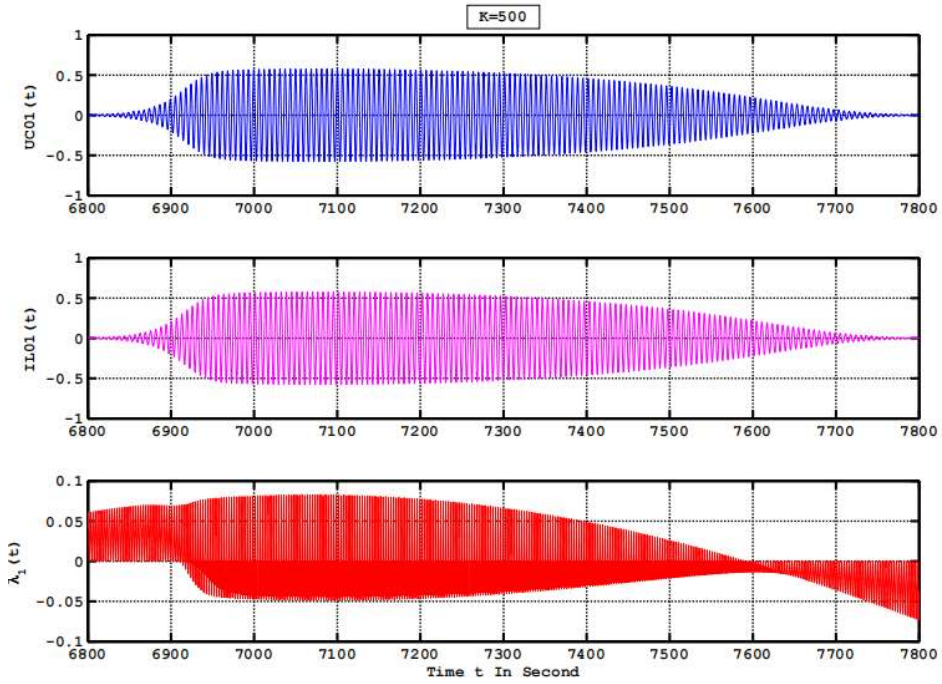


Рисунок 7 – Результати дослідження суперрегенератора при значенні $K = 5\emptyset\emptyset$ (збільшений фрагмент рис. 6)

Figure 7 – Results of the superregenerator studies with K = 5∅∅ (Enlarged fragment of Figure 6)

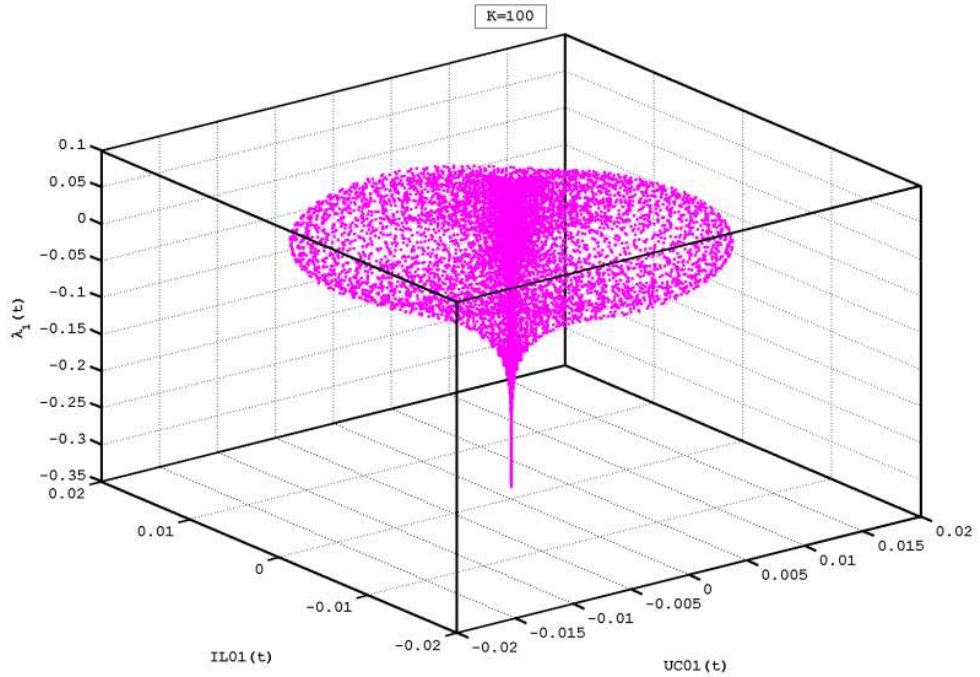


Рисунок 8 – Тривимірний графік $\lambda_1(t)/IL\emptyset1(t)/\mathrm{UC}\emptyset1(t)$ при значенні $K = 1\emptyset$
Figure 8 – Three-dimensional graph for $\lambda_1(t)/IL\emptyset1(t)/\mathrm{UC}\emptyset1(t)$ for $K = 1\emptyset$

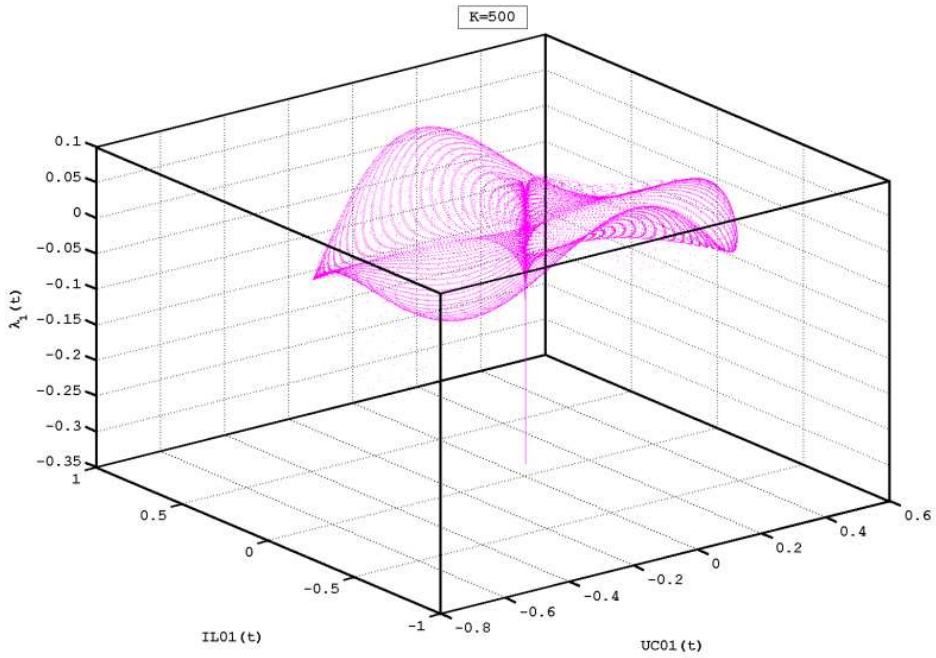


Рисунок 9 – Тривимірний графік $\lambda_1(t)/IL\emptyset1(t)/\mathrm{UC}\emptyset1(t)$ при значенні $K = 5\emptyset\emptyset$
F***igure 9 –*** Three-dimensional graph of $\lambda_1(t)/IL\emptyset1(t)/\mathrm{UC}\emptyset1(t)$ for $K = 5\emptyset\emptyset$

У випадку нелінійного режиму спостерігаємо навіть фазу, коли знаки при $\lambda_1(t)$ можуть осцилювати між собою з частотою власних коливань LC–контура, наприклад це область значень $t = 7000 \ldots 7500$ *сек.* (рис. 7).

На рис. 8 та рис. 9 приведені збільшені фрагменти тривимірного графіка залежностей $\lambda_1(t)$ від $ILØl(t)$ та $ULØl(t)$. Тобто при лінійному, а також нелінійному режимах роботи, спостерігаємо відмінність у поведінці локальних значень величини $\lambda_1(t)$, що дозволяє якісно розрізняти ці режими.

Слід врахувати, що автори дослідження намагались перш за все дати якісну оцінку процесу, оскільки конкретні значення відповідають тільки певному дослідженню.

Висновки. Досліджується модель суперрегенератора із зовнішним гасінням. Приведені диференціальні рівняння, що описують роботу моделі. Запропоновано явище суперрегенерації аналізувати з позицій показників Ляпунова.

Встановлено, що як при лінійному, так і нелінійному (логарифмічному) режимах роботи старший глобальний показник Ляпунова є негативним, що з позицій хаотичної динаміки свідчить про відсутність явища динамічного хаоса в системі.

Показано, що значення глобальних показників Ляпунова практично не залежать від режиму роботи суперрегенератора, тобто частоти його гасіння.

В той же час при будь-якому режимі у період зростання коливань на дуже короткий проміжок часу спостерігається “миттєвий локальний хаос”.

Запропоноване одне із визначень явища суперрегенерації як “миттєвий локальний хаос” в системі, що знаходиться під жорстким контролем періодичності.

Вперше науково доведено, що лінійний та нелінійний режими роботи якісно розрізняються між собою за допомогою значень локальних показників Ляпунова $\lambda_1(Local)$.

Перелік посилань

1. Armstrong E.H. Some recent developments in regenerative circuits. PIRE, 1922, №8, I44-260.

2. Leenaerts D.V.W. Chaotic Behavior in Super Regenerative Detectors. IEEE Transactions on Circuits and Systems I.-Fundamental Theory and Applications. Vol. 43, №3, March 1996, 169 – 176.

3. Leenaerts D. Integrated Transceiver Design: Non – Linear Dynamic Issues. Proceedings NDES, 2001.

4. Commercon J. – C., Badard R. “Chaos” in Superregenerative Receivers. Chaos, Sulitons and Fractals 23, 2005, 1267 – 1274.

5. Артеменко В.А., Петрович В.В. Застосування хаотичного суперрегенератора в задачах моніторинга (Частина 1). – Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 114, Частина 1. 2023, – С. 208- 229.

6. Артеменко В.А., Петрович В.В. Застосування хаотичного суперрегенератора в задачах моніторинга (Частина 2). – Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 115, Частина 2. 2024, – С. 245- 263.

APPLICATION OF SUPERREGENERATIVE RECEIVERS IN ENVIRONMENTAL STUDIES (MONITORING)

Artemenko Vladuslav A., Master of Ecology, UT5UDJ, e-mail: ut5udj@ukr.net, tel. 380936011250, Kyiv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0003-0536-5415

Petrovych Volodymyr V., Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 138, https://orcid.org/0000-0003-0422-2535

Abstract. A nonlinear model describing the operation of a superregenerator with external quenching has been developed.

In order to identify the relationship between the phenomenon of superregeneration and the phenomenon of deterministic chaos, local and global Lyapunov exponent were used. It is classically accepted to judge the presence or absence of deterministic chaos in a dynamic system by the sign of the main global Lyapunov exponent.

The value of the main global Lyapunov exponent during the operation of the superregenerator ALWAYS has a negative value, which indicates the absence of deterministic chaos during the implementation of the superregenerative mode.

But the value of the main local Lyapunov exponent during the operation of the superregenerator for short periods of time still acquires positive values, which indicates outbreaks of local chaos during the implementation of the superregenerative mode.

And the fact that during the operation of the superregenerator the value of the main local Lyapunov exponent for short periods of time still acquires positive values speaks of the deep connection of superregeneration with deterministic chaos.

Also, during the research, we found that in the linear and nonlinear operating modes of the superregenerator, there is a significant difference in the magnitude of the values of the main global Lyapunov exponent, which allows us to clearly distinguish between these modes.

Goal of the work. It is sufficient to study in detail the manifestation of dynamic chaos in the implementation of a superregenerator with external quenching (Both in the linear and nonlinear operating mode of the superregenerator).

Keywords: environment, monitoring, superregenerative receivers, lyapunov exponents, operating modes of the superregenerator.

References

1. Armstrong E.H. Some recent developments in regenerative circuits. PIRE, 1922, №8,-244-260.

2. Leenaerts D.V.W. Chaotic Behavior in Super Regenerative Detectors. IEEE Transactions on Circuits and Systems I.-Fundamental Theory and Applications. Vol. 43, №3, March 1996, 169 – 176.

3. Leenaerts D. Integrated Transceiver Design: Non – Linear Dynamic Issues. Proceedings NDES 2001.

4. Commercon J. – C., Badard R. “Chaos” in Superregenerative Receivers. Chaos, Sulitons and Fractals, 23, 2005, 1267 – 1274.

5. Artemenko V.A., Petrovych V.V. Zastosuvannya khaotychnoho superreheneratora v zadachakh manitorynha (Chastyna 1). – Avtomobilni dorohy i dorozhnye budivnytstvo. Vyp 114, Chastyna 1. 2023,

– S. 208- 229.

6. Artemenko V.A., Petrovych V.V. Zastosuvannya khaotychnoho superreheneratora v zadachakh manitorynha (Chastyna 1). – Avtomobilni dorohy i dorozhnye budivnytstvo. Vyp 115, Chastyna 2. 2024, – S. 245- 263.

УДК 502/504 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-352-357**
UDC 502/504

ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ

NTEGRATED SYSTEM OF ECOLOGICAL ASSESSMENT OF LINEAR INFRASTRUCTURE OBJECTS



***Бакуліч Олена Олександрівна**, професор, кандидат технічних наук, професор кафедри менеджменту Національного транспортного університету, e-mail: bakulich.elena@gmail.com, тел. +3800442808438*

https://orcid.org/0000-0002-5700-0576



***Крюковська Леся Іванівна**, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного транспортного університету e-mail: krjukovska@gmail.com, тел. +380442885100,*

https://orcid.org/0000-0001-8944-8036

Анотація. Сучасний розвиток транспортної інфраструктури закладає основу для підвищених вимог, пов'язаних із забезпеченням екологічної безпеки та пом'якшенням негативного впливу на довкілля. Дослідження практики проєктування автомагістралей виявило недоліки, притаманні звичайним методам екологічної оцінки, які зазвичай зосереджуються на окремих аспектах впливу. Дорожня інфраструктура являє собою багатогранну систему, яка охоплює не тільки асфальтові покриття та земляне покриття, але й пов'язані з ними споруди, що виконують гідротехнічні функції. Такі елементи, як мостові переходи, водопропускні труби, дренажні системи та інші гідрологічні компоненти становлять певні екологічні ризики, які вимагають незалежної оцінки. Огляд сучасних методичних підходів виявив значні недоліки окремого розгляду транспортної та гідротехнічної інфраструктури. Встановлені методики, включаючи оцінку життєвого циклу, оцінку впливу на довкілля, багатокритеріальний аналіз рішень, не враховують належним чином системні взаємодії, синергетичні ефекти та кумулятивні впливи, пов'язані зі складними інфраструктурними ініціативами. Це дослідження має на меті сформулювати інтегровану систему екологічної оцінки лінійних інфраструктурних проєктів, засновану на принципах системності, комплексності та динамічності. Запропонована модульна структура складається з окремих компонентів для оцінки транспортної та гідротехнічної інфраструктури, аналітичного модуля для вивчення системних взаємодій та інтеграційного модуля для консолідації висновків. Практична реалізація розробленої методики гарантує підвищення обґрунтованості висновків щодо екологічної безпеки проєктів, оптимізації проєктних рішень з метою пом'якшення негативних наслідків та забезпечення дотримання вимог природоохоронного законодавства.

Ключові слова: оцінка впливу на довкілля; інфраструктурні проєкти; транспортна інфраструктура; гідротехнічні споруди; інтегрована методологія; екологічна безпека

Вступ. Сучасний розвиток транспортної інфраструктури створює передумови підвищення вимог до забезпечення екологічної безпеки та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Це відбувається тому, що реалізація проєктів має враховувати багатофакторні взаємодії між різними видами інфраструктурних споруд. Оцінка впливу на довкілля (ОВД) планованої діяльності є невід'ємною складовою процесу проєктування та будівництва інфраструктурних об'єктів, що регламентується національним та європейським законодавством.

Практика проєктування автомобільних доріг свідчить про недосконалість традиційних підходів до екологічної оцінки, які зазвичай фокусуються на окремих аспектах впливу. Дорожня інфраструктура являє собою комплексну систему, що включає не тільки асфальтове покриття та земляне полотно, а й супутні споруди гідротехнічного призначення. Мостові переходи, водопропускні труби, дренажні системи та інші гідрологічні елементи створюють специфічні екологічні ризики, які потребують окремого розгляду.

Дослідження, проведені як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями, свідчать, що оцінка впливу окремих компонентів транспортної інфраструктури не враховує сукупні екологічні наслідки. Водночас дослідження мультидисциплінарного характеру також створює проблему у визначенні єдиного наукового методу, який би підходив для різних наукових галузей. Науковці відзначають значний прогрес у застосуванні життєвого циклу оцінки (LCA) для дорожньої інфраструктури, в той же час вважають, що проблеми управління інвентаризацією даних є основною перешкодою для застосування цього методу. [1]. На сьогодні в Україні внаслідок активних бойових дій набуває актуальності врахування нових факторів впливів на компоненти довкілля, спричинених руйнуваннями різних типів інфраструктури, з подальшим забрудненням екосистем, через обстріли, бомбування, вибухи та пожежі [2]. Результати досліджень UNEP та CEOBS (2024) вбачають необхідність розроблення та застосування нових методологій оцінки впливу на довкілля в умовах в умовах активних бойових дій та масштабних руйнувань, що створює додаткові виклики для традиційних підходів до ОВД [3]. Багато авторів виконали систематичній огляд соціальних аспектів сталості дорожньої інфраструктури та соціальних наслідків проектів дорожньої інфраструктури, виявивши суттєві прогалини в існуючих методологіях [4, 5].

Аналіз сучасних трендів дорожнього будівництва свідчить про збільшення проєктів, що передбачають синхронізоване будівництво транспортних та гідротехнічних споруд. Це вимагає нових методів оцінки їх кумулятивного впливу на довкілля, що є предметом нашого дослідження.

Результати і пояснення. Наразі інфраструктурні об’єкти є основним фактором глобального впливу на навколишнє середовище. Наприкінці життєвого циклу дорожньо-транспортні та гідротехнічні споруди генерують 100 мільярдів тонн відходів, з яких приблизно 35% потрапляє на сміттєзвалища. Зокрема, будівництво доріг споживає значну кількість ресурсів і спричиняє значний вплив на довкілля. Крім того, суттєвий вплив на навколишнє середовище пов'язаний зі споживанням викопного палива та енергії, а також з викидами парникових газів, пов'язаними з дорожніми послугами, включаючи освітлення, водовідведення, електроенергію та телекомунікації.Ці наслідки включають пряму шкоду екосистемі (фрагментація та зміна середовищ існування, зміни в характері потоку води, шум, штучне освітлення, забруднення та вплив на дику природу). Крім того, дороги опосередковано

сприяють зміні клімату, виснаженню викопного палива та негативному впливу на здоров'я людини, серед інших наслідків. Нарешті, під час експлуатації автомобільний транспорт також впливає на навколишнє середовище [1].

Гідротехнічні споруди в транспортному будівництві мають значний вплив на навколишнє середовище, змінюючи природні водотоки, порушуючи екосистеми, впливаючи на якість води та перенесення осадів, а також збільшуючи вразливість до зміни клімату. Хоча ці споруди необхідні для управління інфраструктурою, такою як дренаж та боротьба з повенями, вони можуть спричиняти фрагментацію середовищ існування, призводити до евтрофікації та вимагають стійких конструкцій для запобігання аваріям та мінімізації екологічної шкоди. Для усунення цих наслідків необхідне ретельне планування, врахування кліматичної стійкості та використання екологічно чистих матеріалів і підходів до проектування для захисту як забудованих територій, так і природних екосистем [6].

Сучасна методика оцінки впливу інфраструктурних об'єктів на довкілля охоплює кілька основних методологічних підходів з їх специфікою та масштабами: метод LCA, оцінка впливу на довкілля та багатокритеріальний аналіз рішень (рис. 1).



Рисунок 1 – Методики оцінки впливу інфраструктурних об'єктів на довкілля
Figure 1 – Methods for assessing the impact of infrastructure facilities on the environment

Гідротехнічні об'єкти в складі транспортної інфраструктури потребують специфічних підходів до екологічної оцінки, що враховують особливості водних екосистем. Методологія оцінки цих об’єктів базується на трьох основних компонентах: гідрологічне моделювання змін водного режиму, оцінка впливу на водні екосистеми та біорізноманіття, а також моніторинг якості поверхневих і підземних вод. Кожен із цих компонентів включає в себе різні методи та підходи, адаптовані до унікальних характеристик функціональності водної екосистеми (рис. 2).

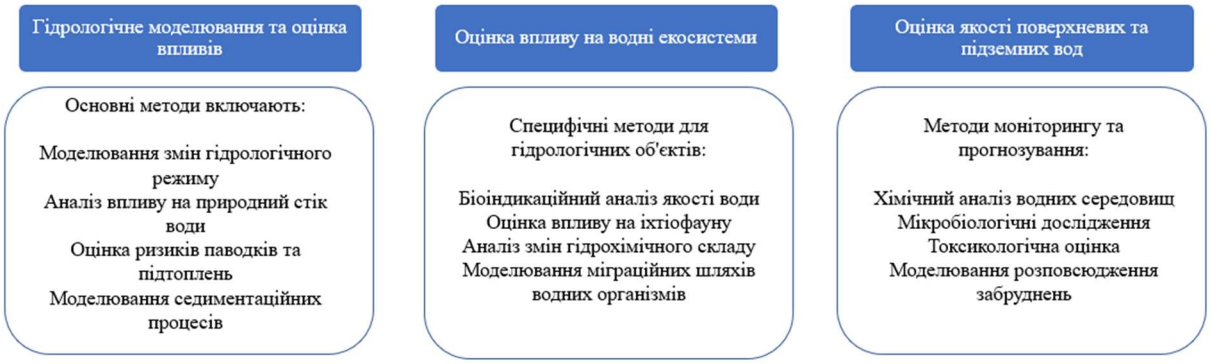


Рисунок 2 – Методики оцінки впливу гідрологічних об’єктів транспортної інфраструктури
Figure 2 – Methods for assessing the impact of hydrological objects on transport infrastructure

Існуючі методики не в змозі повністю оцінити вплив дорожнього стоку на гідротехнічні споруди, зміни гідрологічного режиму внаслідок будівництва доріг, комплексний вплив на прибережні екосистеми та довгострокові наслідки взаємодії систем.

Для усунення виявлених недоліків існуючих підходів пропонується розробити інтегровану систему, яка базується принципах системності, комплексності та динамічності (рис. 3).

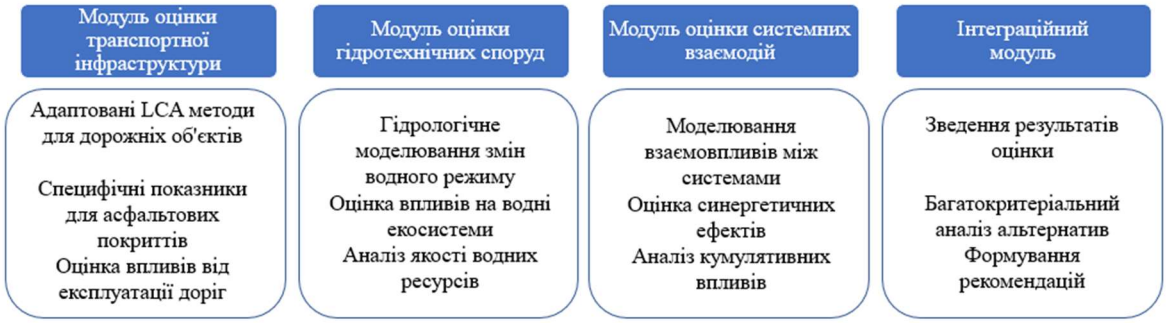


Рисунок 3 – Структура інтегрованої системи
Figure 3 – The structure of the integrated system

Принцип системності зумовлює необхідність розгляду транспортно-гідротехнічної інфраструктури як цілісної системи, яка охоплює всі рівні взаємодії різних її компонентів. Комплексність сприяє комплексній оцінці всіх форм впливу на навколишнє середовище, враховуючи їх потенціал для взаємного посилення або послаблення. Динамічність дозволяє враховувати часову мінливість, притаманну екологічним процесам, а також тривалі наслідки, що випливають з експлуатації об’єктів інфраструктури.

Перевагами запропонованої інтегрованої системи екологічної оцінки лінійних об’єктів інфраструктури є забезпечення комплексної оцінки всіх впливів на довкілля. Застосування методу дає змогу враховувати взаємодію між різними типами інфраструктурних об’єктів та можливість оптимізації проєктних рішень для мінімізації очікуваних впливів та їх зменшення або усунення. Крім того, за результатами оцінки за даним підходом підвищує обґрунтованість висновків щодо екологічної безпеки проектів та їх відповідності вимогам природоохоронного законодавства.

Висновки. Дослідження сучасних методологічних стратегій екологічної оцінки інфраструктурних проектів виявило помітні недоліки ізольованої оцінки транспортної та гідротехнічної інфраструктури. У той час як традиційні методи, такі як оцінка життєвого циклу (LCA), оцінка впливу на довкілля (ОВД) та багатокритеріальний аналіз рішень (MCDA), демонструють ефективність для конкретних типів структур, вони не дають змоги розглядати в комплексі взаємодію систем, синергетичні ефекти та кумулятивні впливи, пов'язані зі складними інфраструктурними ініціативами. Інтегрована система, запропонована для екологічної оцінки об'єктів лінійної інфраструктури, ґрунтується на принципах систематичності, комплексності та динамічності, що дозволяє вирішити обмеження, притаманні поточним методологіям. Ця модульна структура містить окремі компоненти для оцінки транспортної та гідравлічної інфраструктури, аналітичний модуль для вивчення взаємодії системи та інтеграційний модуль для консолідації висновків. Практична реалізація розробленої методики має на меті забезпечити підвищення обґрунтованості зроблених висновків щодо екологічної безпеки проєктів, а також оптимізацію проєктних рішень для зменшення негативних впливів та забезпечення дотримання природоохоронного законодавства. Цей запропонований підхід має значну актуальність, особливо в контексті відновлення інфраструктури України після збитків, пов'язаних з війною, де важливо враховувати нові екологічні фактори ризику.

Перелік посилань

1. Picardo, A., Soltero, V. M., & Peralta, E. Life Cycle Assessment of Sustainable Road Networks: Current State and Future Directions. *Buildings.* 2023. №13(10), 2648. https://doi.org/10.3390/buildings13102648

2. Ukraine - Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4): February 2022 - December 2024 (English). URL: https://www.undp.org/ukraine/publications/ukraine-fourth-rapid-damage-and-needs-assessment-rdna4-february-2022-december-2024-english (дата звереннння 01.09.2025)

3. CEOBS Environmental Assessment (2024). URL: https://reliefweb.int/report/ukraine/assessing-environmental-damage-ukraine-february-2024 (дата звереннння 08.08.2025)

4. Vijayakumar, A., Mahmood, M.N., Gurmu, A. Social sustainability assessment of road infrastructure: a systematic literature review. *Qual Quant*. 2024. № 58, 1039–1069. https://doi.org/10.1007/s11135-023-01683-y.

5. Pius Kahangirwe, Frank Vanclay, Jos Arts. Using environmental and social impact assessment to improve tourism infrastructure projects in protected areas: green tourism in the Kalinzu Central Forest Reserve in Uganda. *Journal of Environmental Planning and Management* 0:0, pages 1-24.

6. . Ghani Muhammad, Yonglai Zheng, Alrasheed Khaled, Raja, Babar. Factors Influencing Performance, Durability, and Environmental Impact of Hydraulic Structures Using Waste Composite. *Civil Engineering Journal*. 2025. 11. 2536-2559. https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-06-021.

INTEGRATED SYSTEM OF ECOLOGICAL ASSESSMENT OF LINEAR INFRASTRUCTURE OBJECTS

Bakulich Olena O., National Transport University, Ph.D, Professor at the Department of Management, e-mail: bakulich.elena@gmail.com, tel. +3800442808438, Ukraine, Kyiv 01010, 1 M. Omelianovycha-Pavlenka Str., https://orcid.org/0000-0002-5700-0576.

Kriukovska Lesia I., National Transport University, Ph.D., Associate professor at the Department of Ecology and Environmental Protection technology, e-mail: krjukovska@gmail.com, tel. +380442885100, Ukraine, Kyiv 01010, 1 M. Omelianovycha-Pavlenka Str., https://orcid.org/0000-0001-8944-8036

Abstract. The current development of transport infrastructure lays the foundation for increased requirements related to ensuring environmental safety and mitigating negative impacts on the environment. Research into highway design practices has revealed shortcomings inherent in conventional environmental assessment methods, which typically focus on individual aspects of impact. Road infrastructure is a multifaceted system that includes not only asphalt and earthen surfaces, but also related structures that perform hydraulic functions. Elements such as bridge crossings, culverts, drainage systems, and other hydrological components pose specific environmental risks that require independent assessment. A review of current methodological approaches has revealed significant shortcomings in the separate consideration of transport and hydraulic infrastructure. Established methodologies, including life cycle assessment, environmental impact assessment, and multi-criteria decision analysis, do not adequately consider the systemic interactions, synergistic effects, and cumulative impacts associated with complex infrastructure initiatives. This study aims to formulate an integrated system for the environmental assessment of linear infrastructure projects based on the principles of systematicity, comprehensiveness, and dynamism. The proposed modular structure consists of separate components for assessing transport and hydraulic infrastructure, an analytical module for studying systemic interactions, and an integration module for consolidating conclusions. The practical implementation of the developed methodology guarantees more reliable conclusions regarding the environmental safety of projects, optimization of project decisions to mitigate negative consequences, and compliance with environmental legislation.

Keywords: environmental impact assessment; infrastructure projects; transport infrastructure; hydraulic structures; integrated methodology; environmental safety.

References

1. Picardo, A., Soltero, V. M., & Peralta, E. Life Cycle Assessment of Sustainable Road Networks: Current State and Future Directions. *Buildings.* 2023. №13(10), 2648. https://doi.org/10.3390/buildings13102648

2. Ukraine - Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4): February 2022 - December 2024 (English). URL: https://www.undp.org/ukraine/publications/ukraine-fourth-rapid-damage-and-needs-assessment-rdna4-february-2022-december-2024-english (дата звернення 01.09.2025)

3. CEOBS Environmental Assessment (2024). URL: https://reliefweb.int/report/ukraine/assessing-environmental-damage-ukraine-february-2024 (дата звернення 08.08.2025)

4. Vijayakumar, A., Mahmood, M.N., Gurmu, A. Social sustainability assessment of road infrastructure: a systematic literature review. *Qual Quant*. 2024. № 58, 1039–1069. https://doi.org/10.1007/s11135-023-01683-y.

5. Pius Kahangirwe, Frank Vanclay, Jos Arts. Using environmental and social impact assessment to improve tourism infrastructure projects in protected areas: green tourism in the Kalinzu Central Forest Reserve in Uganda. *Journal of Environmental Planning and Management* 0:0, pages 1-24.

6. Ghani Muhammad, Yonglai Zheng, Alrasheed Khaled, Raja, Babar. Factors Influencing Performance, Durability, and Environmental Impact of Hydraulic Structures Using Waste Composite. *Civil Engineering Journal*. 2025. 11. 2536-2559. https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-06-021.

УДК: 502/504
UDC 502/504

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-358-367

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ПЛАНОВАНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ З РЕАЛІЗАЦІЇ ІНФРАСТРУКТУРНИХ ПРОЄКТІВ НА ЕТАПІ ПРОЄКТУВАННЯ

RITERIA FOR EVALUATING PLANNED ACTIVITIES FOR THE IMPLEMENTATION OF INFRASTRUCTURE PROJECTS AT THE DESIGN STAGE



Хрутьба Вікторія Олександрівна, *доктор технічних наук, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного транспортного університету, e- mail: v.khrutba@ntu.edu.ua, тел. +380442885100,*

https://orcid.org/0000-0002-8121-2042



Рутковська Інесса Анатоліївна*, кандидат технічних наук, професор кафедри системного проєктування об'єктів транспортної інфраструктури та геодезії Національного транспортного університету, e-mail: nttn@i.ua, тел. +380442800813,*

https://orcid.org/0000-0001-7832-4222



Хрутьба Юлія Сергіївна*, кандидат економічних наук, докторант кафедри екології та природоохоронних технологій Державного університету «Житомирська політехніка», e-mail hrutbaj@gmail.com, тел. +380956615360,*

https://orcid.org/0000-0002-3419-8364

Анотація. Дослідження впливу на довкілля є центральним документом, який подається для початку офіційного інституційного процесу прийняття рішення щодо впровадження планованої діяльності. На сьогодні існує постійно зростаючий обсяг досліджень з оцінки впливу на довкілля (ОВД), значна частина яких ґрунтується на практиці або спрямована на її розвиток. Ця процедура широко застосовується у розвинених країнах та активно впроваджується у країнах, що розвиваються, підтверджуючи свою ефективність. Головною перевагою процедури ОВД є можливість комплексного врахування впливу інфраструктурних проєктів та технічних альтернатив на довкілля вже на ранніх стадіях проєктування. Важливим є відображення у звіті з ОВД критеріїв, за якими відбувалась оцінка технічних альтернатив, щоб забезпечити прозорість процесу та можливість для громадськості

усвідомити обґрунтованість вибору найбільш екологічно прийнятної альтернативи для конкретного інфраструктурного проєкту. Особливої актуальності набуває проблема оцінки впливу інфраструктурних проєктів на водні об'єкти, оскільки водні екосистеми є найбільш вразливими до антропогенного впливу та потребують спеціальних підходів до оцінки. Відсутність уніфікованих критеріїв оцінки технічних альтернатив ускладнює прийняття екологічно обґрунтованих рішень.

Стаття присвячена розробці системи критеріїв оцінки планованої діяльності інфраструктурних проєктів на етапі проєктування в рамках процедури оцінки впливу на довкілля. Розглянуто особливості формування критеріїв для різних типів інфраструктурних об'єктів з особливим акцентом на вплив на водні об'єкти. Запропоновано методологію порівняння технічних альтернатив на основі багатокритеріального аналізу. Розроблено систему показників для оцінки впливу на водне середовище, включаючи якість поверхневих та підземних вод, гідрологічний режим та морфологічні зміни водотоків. Представлено практичний приклад застосування розроблених критеріїв для оцінки альтернативних рішень інфраструктурного проєкту. Наукова новизна роботи полягає у розробці комплексної системи критеріїв, адаптованої до специфіки різних типів інфраструктурних об'єктів. Особливу увагу приділено критеріям оцінки впливу на гідрологічний режим, якість води та морфологію водотоків, що дозволяє більш точно прогнозувати екологічні наслідки планованої діяльності.

***Ключові слова*:** інфраструктурні проєкти; оцінка впливу на довкілля; критерії оцінки; технічні альтернативи; водні об'єкти; комунікації із зацікавленими сторонами

***Вступ*.** Оцінка впливу на довкілля (ОВД) стосується розгляду ймовірних екологічних наслідків запропонованої дії та, з урахуванням цих знань, визначення можливих відповідей. Зазвичай вона включає кілька етапів: скринінг для визначення чи може запропонована діяльність мати значний вплив на навколишнє середовище; визначення обсягу робіт для виявлення ключових питань, що стосуються ОВД; розгляд альтернатив; дослідження та висновки щодо базових станів навколишнього середовища, проведення ОВД та вжиття заходів щодо пом'якшення наслідків; розробка плану екологічного моніторингу; сприяння участі громадськості; розгляд звіту про ОВД та прийняття рішень; інформування громадськості про остаточне рішення. [1]. Основна задача процедури – упевнитися, що перед впровадженням проєкту з'ясовано й враховано не тільки масштаби та значущість можливого впливу планованої діяльності, а також достовірність обрання найкращої з точки мінімізації негативного впливу на довкілля технічної альтернативи серед розглянутих варіантів.

Сучасний розвиток інфраструктури характеризується зростанням масштабів та складності проєктів, що супроводжується посиленням антропогенного впливу на навколишнє середовище. Інфраструктурні проєкти, включаючи транспортні, енергетичні, водогосподарські та комунальні об'єкти, формують основу економічного розвитку країни, проте їх реалізація часто призводить до значних екологічних наслідків.

Особливої уваги потребує вплив інфраструктурних проєктів на водні об'єкти, оскільки водні екосистеми є одними з найбільш вразливих до антропогенного впливу. Закономірності такого впливу включають зміни гідрологічного режиму, погіршення якості води, порушення морфології водотоків та деградацію водних екосистем.

У Законі України «Про оцінку впливу на довкілля» передбачено розділ «опис виправданих альтернатив (наприклад, географічного та/або технологічного характеру) планованої діяльності,

основних причин обрання запропонованого варіанта з урахуванням екологічних наслідків» [2]. Цей розділ має важливе значення для донесення інформації про технічні альтернативи, що розглядались для проєкту. Вибір альтернативи має здійснюватись, з урахуванням критеріїв, зрозумілих широкому колу зацікавлених сторін. Важливість розробки критеріїв для ОВД є критичним для підвищення прозорості та сприяння участі громадськості у процесі прийняття рішень щодо впровадження проєктних рішень. Проте відсутність уніфікованих критеріїв та методів такого порівняння ускладнює прийняття обґрунтованих рішень.

Дослідженнями індикаторів екологічної безпеки території займалися В.М. Лагутін, В.В.Анікієв , П.В.Захарова , О.В. Бикова, М.Х. Царану, Т.І. Криллова та ін., проблематику оцінки впливу на довкілля в своїх наукових працях розглядали О.В. Матухно, В.В. Шаравара, О.О. Бондаренко, О.Г. Тарасова, І.М. Барна. Однак питання розробки комплексної системи критеріїв оцінки планованої діяльності інфраструктурних проєктів на етапі проєктування, особливо в контексті впливу на водні об'єкти та порівняння технічних альтернатив, залишаються недостатньо вивченими.

Результати і пояснення. Розвиток масштабної інфраструктури має вирішальне значення для економічного зростання та суспільного прогресу, але часто створює значні екологічні проблеми [3]. Проєкти, такі як автомагістралі, дамби та розширення міст, можуть призвести до вирубки лісів, втрати середовища існування біорізноманіття, ерозії ґрунту, забруднення повітря та води, а також викидів парникових газів. Розробка ефективної методології оцінки впливу потребує урахування технічних характеристик різних типів інфраструктурних об'єктів та специфіки їх взаємодії з компонентами довкілля.

Інфраструктурні проєкти за характером впливу на довкілля можна класифікувати на лінійні, точкові, площинні та водогосподарські об’єкти (рис. 1)

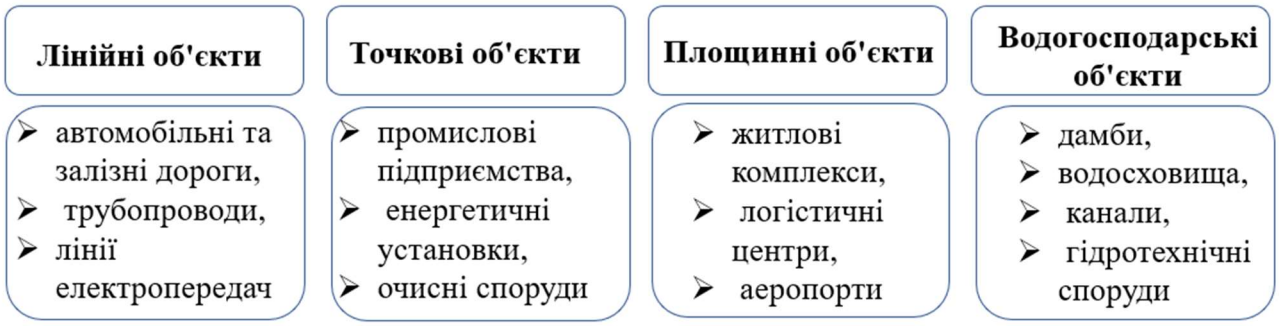


Рисунок 1 – Класифікація інфраструктурних проєктів
Figure 1 – Classification of infrastructure projects

Лінійні інфраструктурні об'єкти характеризуються великою протяжністю при відносно незначній ширині та створюють певні форми екологічного впливу. Автомобільні та залізничні магістралі, трубопроводи та лінії електропередач створюють ефект бар’єру, що, як наслідок, спричиняє фрагментацію природних екосистем, а також порушення міграційних коридорів фауни. Взаємодія між цими спорудами та ґрунтовим покривом проявляється в процесах ущільнення, а також водної та вітрової ерозії, які відбуваються вздовж транспортних коридорів. Забруднення атмосферного повітря

відбувається через викиди забруднюючих речовин транспортними засобами, утворення пилу та зміни місцевих повітряних потоків.

Промислові підприємства, електростанції, аеропорти відносяться до категорії точкових об'єктів інфраструктури з концентрованим впливом на обмеженій території, але вплив може поширюватися на великі відстані. Забруднюючі речовини, з якими взаємодіє атмосферне повітря, реалізуються як точкові та організовані джерела викидів, створення теплового острова та акустичного шуму. Вплив на водні ресурси відбувається через скиди стічних вод, теплове забруднення, порушення гідрологічного режиму водойм. Ґрунтовий покрив деградує через хімічне забруднення, ущільнення важкими машинами та накопичення промислових відходів.

Масштабні зміни ландшафтної структури в межах території розвиваються під впливом функціонування площинних об'єктів інфраструктури, такими як міська забудова, промислові зони, кар'єри. Вплив відбувається через ущільнення ґрунтового покриву та змін мікрокліматичних умов. До числа впливів гірничих комплексів відносяться порушення геологічної будови, а також зміни рівня ґрунтових вод і техногенних форм рельєфу. Переміщення природних біоценозів і створення антропогенних екологічних ніш характеризують взаємодію з біотичними компонентами середовища.

Гідротехнічні споруди, водосховища і меліоративні системи істотно впливають на гідрологічні процеси і водну екосистему. Взаємодія з поверхневими водами відбувається шляхом регулювання умов течії гідродинамічного режиму та температурної стратифікації у водоймах. Вплив на підземні водоносні горизонти пов'язаний зі зміною тиску, порушенням природного кругообігу, затопленням прилеглих територій. Прибережні та водно-болотні екосистеми трансформуються як функція трансформації гідрологічного режиму, яка спричиняє сукцесійні зміни серед рослинних угруповань і перериває цикл розмноження водних організмів.

Критерії та показники впливу інфраструктурних проєктів на довкілля систематизують за такими аспектами: *об'єкт оцінювання* (за локацією; за місцем; за будівництвом (експлуатацією, ремонтом); *стадія життєвого циклу об'єкту* (типові для нових; типові для вже існуючих); *тип інформації, що оцінюється* (критерії, в основу яких покладено заплановані чи розраховані показники; критерії, які базуються на виміряних або інших фактичних даних); *характеристика впливу* (прямий чи опосередкований); *складність* (критерії, представлені одним параметром, критерії, що описуються багатьма параметрами; *характер процесу оцінювання* (кількісні, описові, якісні); *система просторових обмежень* (глобальні, регіональні, локальні); *система часових обмежень* (зафіксований вплив протягом наступних 100 років, короткочасний
вплив) [4].

Процес проєктування інфраструктурних об'єктів передбачає розгляд альтернативних технічних рішень, які можуть суттєво відрізнятися за характером та масштабом впливу на довкілля. Порівняльну оцінку технічних альтернатив пропонується здійснювати з використанням спеціалізованих критеріїв, що дозволить обґрунтовано обрати варіант з найменшим негативним впливом на екосистеми та компоненти навколишнього середовища.

Критерії оцінки впливу на довкілля реалізації проєкту та критерії порівняння його технічних альтернатив мають важливі відмінності у своєму призначенні та використанні. Критерії оцінки проєкту спрямовані на знаходження абсолютних показників впливу на фактори природи та встановлення відповідності нормам екологічної безпки, тоді як критерії порівняння альтернатив зосереджені на відносній оцінці плюсів і мінусів різних технічних варіантів. Перша група критерієв

передбачає фіксовані межові значення та стандарти якості навколишнього середовища, а друга – ґрунтується на аналізі для порівняння і ранжуванні альтернатив за ступенем екологічної прийнятності (рис. 2).

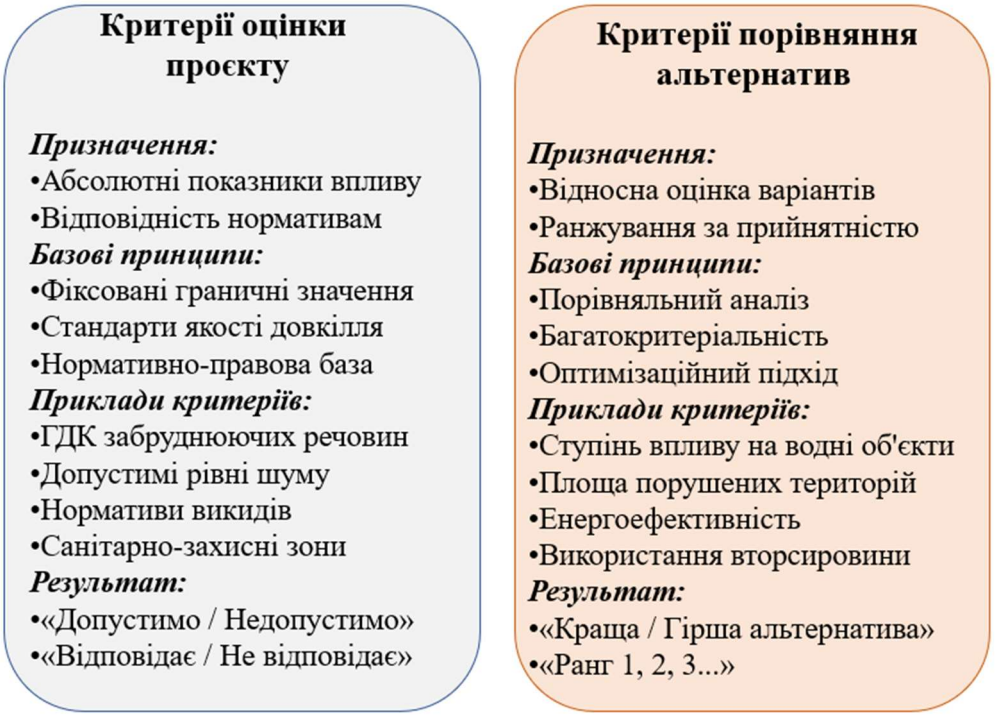


Рисунок 2 – Критерії оцінки впливу на довкілля. Основні відмінності
Figure 2 – Environmental impact assessment criteria. Main differences

Для порівняння технічних альтернатив інфраструктурних проєктів застосовується багатокритеріальний аналіз, що дозволяє комплексно оцінити екологічні, технічні та економічні аспекти кожної альтернативи

Для кожного *i*-го критерію (наприклад, «вплив на якість водних ресурсів», «вплив на атмосферне повітря» тощо) проводиться експертна оцінка за вісьмома параметрами:

Небезпека впливу – оцінює потенційну загрозу для здоров'я людини та стану екосистем. Враховується токсичність речовин, ймовірність аварійних ситуацій, незворотність змін у довкіллі.

Відповідність законодавчим вимогам – характеризує ступінь дотримання нормативно-правових актів у сфері охорони довкілля, санітарних норм, міжнародних стандартів.

Громадська думка – відображає рівень занепокоєння населення, активність громадських організацій, результати громадських слухань та консультацій.

Масштаб впливу – визначає просторові межі поширення впливу (локальний, регіональний, національний), кількість уражених об'єктів та територій.

Фінансові витрати – оцінює економічні наслідки впливу, включаючи витрати на відновлення, компенсацію збитків, запобіжні заходи.

Інноваційні технології – характеризує використання сучасних екологічно чистих технологій, методів мінімізації впливу, альтернативних рішень.

Тривалість впливу – визначає часові рамки дії впливу: короткострокові (до 1 року), середньострокові (1-10 років), довгострокові (понад 10 років).

Можливість управління – оцінює здатність контролювати та регулювати вплив, ефективність запобіжних заходів, можливість швидкого реагування на зміни.

Кожен з параметрів оцінюється за бальною шкалою від 0 до 3, де:

0 балів – відсутність впливу або мінімальне значення

1 бал – слабкий вплив або низьке значення

2 бали – помірний вплив або середнє значення

3 бали – сильний вплив або високе значення

Інтегральна оцінка розраховується як зважена сума всіх параметрів з урахуванням їх відносної важливості для конкретного типу впливу.

Для систематизації оцінки альтернатив використовується матриця рішень (табл. 1).

Таблиця 1 **–** Матриця порівняння альтернатив
Table 1 – Matrix of comparison of alternatives

Критерій	Альтернатива 1	Альтернатива 2	Альтернатива n	Вага
K_атмосфера	a_{11}	a_{12}	a_{1n}	w_1
K_вода	a_{21}	a_{22}	a_{2n}	w_2
K_грунт	a_{31}	a_{32}	a_{3n}	w_3
...	...	...	...	...

Інтегральна оцінка альтернативи розраховується як:

$$S_j = \sum_{i=1}^{m} w_i \cdot a_{ij} \quad (1)$$

Система базових критеріїв для інфраструктурних проєктів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Базові критерії оцінки впливу інфраструктурних проєктів на довкілля
Table 2 – Basic criteria for assessing the environmental impact of infrastructure projects

Категорія критерію	Показник	Лінійні об'єкти	Точкові об'єкти	Площинні об'єкти	Водогосп. об'єкти
Атмосферне повітря	Викиди забруднюючих речовин	XX	XXX	XX	X
	Викиди парникових газів	XX	XXX	XX	X
	Концентрація твердих частинок	XX	XX	X	XX
Водні ресурси	Якість поверхневих вод	X	XXX	XX	XXX
	Якість підземних вод	XX	XXX	XX	XX

Категорія критерію	Показник	Лінійні об'єкти	Точкові об'єкти	Площинні об'єкти	Водогосп. об'єкти
	Гідрологічний режим	X	X	X	XXX
	Морфологія водотоків	XX	X	X	XXX
	БСК/ХСК води	X	XXX	XX	XX
Ґрунти та геологія	Забруднення ґрунтів	XX	XXX	XX	X
	Ерозійні процеси	XX	X	X	XX
	Геологічна стабільність	X	XX	XX	XXX
Біорізноманіття	Фрагментація екосистем	XXX	X	XX	XX
	Водні екосистеми	XX	XX	X	XXX
	Міграційні шляхи тварин	XXX	X	XX	XX
Фізичні фактори	Шумове забруднення	XXX	XX	XX	X
	Вібраційний вплив	XX	XX	XX	X
	Електромагнітні поля	XX	XXX	X	X
Соціальне середовище	Транспортна доступність	XXX	XX	XXX	X
	Рекреаційна цінність	XX	X	XX	XXX
	Культурна спадщина	XX	XX	XX	XX

***Позначення*:**
- XXX – критичний вплив (первинний критерій оцінки)
- XX – значний вплив (важливий критерій)
- X – помірний вплив (додатковий критерій)

Розглянемо застосування розроблених критеріїв для оцінки альтернативних варіантів будівництва мостового переходу через річку середнього розміру (ширина 180 м) в рамках реконструкції автомобільної дороги державного значення. Ділянка проходить у водоохоронній зоні річки з цінними рибогосподарськими угіддями.

Альтернатива 1: Балковий міст з проміжними опорами у воді (3-прольотна конструкція) *Альтернатива 2*: Вантовий міст з одним прольотом над річкою (однопрольотна конструкція без опор у воді)

Таблиця 3 – Порівняльна оцінка альтернатив за критеріями впливу на водні об'єкти
Table 3 – Comparative assessment of alternatives according to the criteria of impact on water bodies

Критерій	Балковий міст	Вантовий міст	Вага
Гідрологічний режим			
Зміна швидкості течії	8	1	0,25
Вплив на льодохід та паводки	9	0	0,20
Зміна рівневого режиму	6	0	0,15
Якість води під час будівництва			
Каламутність від робіт у воді	12	3	0,15
Забруднення нафтопродуктами	8	4	0,10
Морфологія русла			
Ерозія дна біля опор	10	0	0,10
Вплив на міграцію риби	7	1	0,05

Інтегральна оцінка а критеріями впливу на водні об'єкти:

- Балковий міст: 8,25 балів (гірший)
- Вантовий міст: 1,40 балів (кращий)

Найкращою за комплексними критеріями є альтернатива вантового мосту, що забезпечує мінімальний вплив на водний об'єкт та його екосистему при дещо вищих економічних витратах.

Висновки. Використання запропонованого способу оцінки технічних альтернатив об'єкту планованої діяльності з багатьма критеріями дозволяє вибрати менш шкідливу альтернативу на основі числових розрахунків та прозорого пояснення. Важлива перевага такого підходу є можливість для всіх зацікавлених груп бачити реальні обчислення, зрозуміти які саме критерії були оцінені, яка вага була дана кожному з них, та як утворився остаточний результат. Це підвищує довіру до процесу прийняття рішень і дозволяє громадськості усвідомлено брати участь у слуханнях по питанням впливу на довкілля. Крім того структурований спосіб порівняння альтернатив мінімізує суб'єктивність при виборі найкращого варіанту реалізації інфраструктурних проєктів і забезпечує наукове врахування екологічних факторів на етапі планування.

Перелік посилань

1. Wang Y and Pan X. Application of the environmental impact assessment provisions under the BBNJ Agreement in high seas marine protected area: challenges and suggestion. *Frontiers in Marine Science*. 12:1589936. (2025) doi: 10.3389/fmars.2025.1589936

2. Про оцінку впливу на довкілля: Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text (дата звернення: 03.09.2025).

3. Mccall, Andrei. Assessment and Mitigation of Environmental Impacts in Large-Scale Infrastructure Development. (2024). URL: https://www.researchgate.net/publication/387311604_Assessment_and_Mitigation_of_Environmental_Impacts_in_Large-Scale_Infrastructure_Development (дата звернення: 01.08.2025).

4. Khrutba, V., Morozova, T., Kharchenko, A., Rutkovska, I., Herasymenko, A. Environmental Impact Assessment of the Planned Activity of Aviation Transport. In: Boichenko, S., Yakovlieva, A., Zaporozhets, O., Karakoc, T.H., Shkilniuk, I., Dalkiran, A. (eds) *Sustainable Transport and Environmental Safety in Aviation . Sustainable Aviation. Springer, Cham.*. (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-34350-6_3.

CRITERIA FOR EVALUATING PLANNED ACTIVITIES FOR THE IMPLEMENTATION OF INFRASTRUCTURE PROJECTS AT THE DESIGN STAGE

Khrutba Viktoriia O., National Transport University, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, e-mail: v.khrutba@ntu.edu.ua, tel.: +380442885100, Ukraine, 01010, Kyiv, 1 M. Omelianovycha-Pavlenka Str., https://orcid.org/0000-0002-8121-2042

Rutkovska Inessa A., National Transport University, Ph.D., Professor of the Department of System Design of Transport Infrastructure and Geodesy, e-mail: nttn@i.ua, tel.: +380442800813, https://orcid.org/0000-0001-7832-4222

Khrutba Yuliia S., Zhytomyr Polytechnic State University, Ph.D., Doctoral Candidate at the Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, e-mail: hrutbaj@gmail.com, тел. +380956615360, Ukraine, 10005, Zhytomyr, 103 Chudnivska St., https://orcid.org/0000-0002-3419-8364.

Abstract. An environmental impact assessment is a key document submitted to initiate the formal institutional decision-making process for the implementation of a planned activity. Today, there is a growing body of research on environmental impact assessments (EIAs), much of which is based on practice or aimed at its development. This procedure is widely used in developed countries and is being actively implemented in developing countries, confirming its effectiveness. The main advantage of the EIA procedure is the ability to comprehensively consider the impact of infrastructure projects and technical alternatives on the environment at the early stages of design. It is important to reflect in the EIA report the criteria used to evaluate technical alternatives in order to ensure the transparency of the process and enable the public to understand the rationale for choosing the most environmentally acceptable alternative for a specific infrastructure project. The issue of assessing the impact of infrastructure projects on water bodies is particularly relevant, as aquatic ecosystems are most vulnerable to anthropogenic impacts and require special approaches to assessment. The lack of unified criteria for assessing technical alternatives complicates the process of making environmentally sound decisions.

The article is devoted to the development of a system of criteria for assessing the planned activities of infrastructure projects at the design stage as part of the environmental impact assessment procedure. The peculiarities of forming criteria for different types of infrastructure objects are considered, with a special emphasis on the impact on water objects. A methodology for comparing technical alternatives based on multi-criteria analysis is proposed. A system of indicators for assessing the impact on the aquatic environment has been developed, including the quality of surface and groundwater, the hydrological regime, and morphological changes in watercourses. A practical example of the application of the developed criteria for evaluating alternative solutions for an infrastructure project is presented. The scientific novelty of the work lies in the development of a comprehensive system of criteria adapted to the specifics of different types of infrastructure facilities. Particular attention is paid to the criteria for assessing the impact on the hydrological regime, water quality, and morphology of watercourses, which allows for a more accurate prediction of the environmental consequences of the planned activity.

Keywords: infrastructure projects; environmental impact assessment; assessment criteria; technical alternatives; water bodies; communication with stakeholders

References

1. Wang Y and Pan X. Application of the environmental impact assessment provisions under the BBNJ Agreement in high seas marine protected area: challenges and suggestion. *Frontiers in Marine Science*. 12:1589936. (2025) https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1589936 [in English].

2. Pro otsinku vplyvu na dovkillia: Zakon Ukrainy vid 23.05.2017 № 2059-VIII // Baza danykh Zakonodavstvo Ukrainy / Verkhovna rada Ukrainy. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text (data zvernennia: 03.09.2025) [in Ukrainian].

3. Mccall, Andrei. Assessment and Mitigation of Environmental Impacts in Large-Scale Infrastructure Development. (2024). URL: https://www.researchgate.net/publication/387311604 _Assessment_and_Mitigation_of_Environmental_Impacts_in_Large-Scale_Infrastructure_Development (data zvernennia: 01.08.2025) [in English].

4. Khrutba, V., Morozova, T., Kharchenko, A., Rutkovska, I., Herasymenko, A. Environmental Impact Assessment of the Planned Activity of Aviation Transport. In: Boichenko, S., Yakovlieva, A., Zaporozhets, O., Karakoc, T.H., Shkilniuk, I., Dalkiran, A. (eds) *Sustainable Transport and Environmental Safety in Aviation. Sustainable Aviation. Springer, Cham.* (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-34350-6_3 [in English].

УДК 303.732:656.07 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-368-374**
UDC 303.732:656.07

СИСТЕМНІ ПІДХОДИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В МІСЬКИХ УМОВАХ

SYSTEMIC APPROACHES TO SUSTAINABLE MOBILITY IN URBAN SETTINGS



Артемчук Юлія Володимирівна, *Національний транспортний університет, кафедра транспортних систем та безпеки дорожнього руху, Київ, Україна, асистент, e-mail: art_julia@i.ua, тел.: +380636047172,*

https://orcid.org/0000-0002-3872-7745

Анотація. Основна мета цього дослідження полягає в розгляді та аналізі екологічних інновацій, що сприяють сталому розвитку мобільності, які або відносяться до транспортної політики та поступового вдосконалення транспортних технологій, або належать до групи інновацій, що спричиняють зміни транспортних технологій та транспортної системи в цілому, для зниження викидів в міських умовах.

Ключові слова. Сталий розвиток, стала мобільність, екологічні інновації, транспортна політика, екодрайвінг.

Вступ. Транспортна діяльність – це сукупність засобів, шляхів сполучення, технічних пристроїв та інфраструктури, що забезпечують переміщення людей, вантажів, сигналів та інформації з одного місця в інше, забезпечує потреби суспільства в перевезеннях, та є важливою галуззю економіки. Отже транспорт своєю роботою впливає на навколишнє середовище.

Економічний розвиток та сталість регіону і країни, покращення якості життя населення можливі лише за умови сталої та ефективної роботи транспортних систем. Тому сталий розвиток мобільності і вжиття ефективних технічних, організаційних та технологічних заходів для вдосконалення процесів у транспортних системах є запорукою розвитку соціальної та економічної сфер. Значні сучасні проблеми транспортних систем здебільшого спричинені прискоренням урбанізації та автомобілізації к населених пунктів, так і міжміського сполучення. Другорядними чинниками ефективності функціонування транспортних систем є необхідність дотримання прийнятного рівня якості середовища проживання населення в районі пролягання транспортних мереж та чистоти навколишнього середовища. Таким чином, в сучасному світі актуальним стає впровадження розумної сталої мобільності, за рахунок якої забезпечується як доступність до місць роботи та відпочинку, так і збереження природних екосистем.

Основна частина. В роботі [1] наведено загальний огляд взаємодії транспорту з суспільством, економікою та довкіллям (рис.1).

Існує багато визначень сталої мобільності, але практично всі є похідними від визначення, яке було опубліковане у доповіді під назвою «Our Common Future» Всесвітньою комісією з питань навколишнього середовища та розвитку ще у 1987 році [2]: «Сталий розвиток (англ. sustainable development) – розвиток, який дає змогу задовольнити потреби теперішніх поколінь і залишає можливість майбутнім поколінням задовольнити їхні потреби». Це збалансований розвиток країни і регіонів, при якому економічне зростання, матеріальне виробництво і споживання, а також інші види діяльності суспільства відбуваються в межах, які визначаються здатністю екосистем відновлюватися, поглинати забруднення та підтримувати життєдіяльність теперішнього і майбутніх поколінь.



Рисунок 1 – Транспорт та трикутник сталого розвитку
Figure 1 – Transport and the sustainability triangle

Всесвітня бізнес-рада зі сталого розвитку (WBCSD) у своєму Проекті сталої мобільності (SMP) розробила цільове визначення: «Сталий рух – це здатність задовольняти потреби суспільства у вільному пересуванні, отриманні доступу, спілкуванні, торгівлі та встановленні відносин без шкоди для інших важливих людських чи екологічних цінностей, сьогодні чи в майбутньому» [3, 4].

Дуже важливим проектом зі сталої мобільності був проект (EST) з екологічно сталого транспорту (EST), який визначив сталий транспорт як вираження сталого розвитку в транспортному секторі, посилаючись таким чином на визначення з [2]. Згодом цей проєкт визнав що стала мобільність є синонімом сталого транспорту, який використовується Європейською Комісією [5].

В роботі [6] пропонується розглядати сталий рух як ширше поняття, ніж сталий транспорт, оскільки останній включає лише транспортну діяльність та пов'язаний з нею вплив, тоді як перший додатково включає можливості та доступність, що створюються транспортною системою.

Ще одним відповідним дослідницьким проектом, що фінансувався Європейським фондом, був POSSUM [7], який розумів сталу мобільність як «підмножину сталого розвитку». Це стосується питання: «як може бути можливим соціальний та економічний розвиток у глобальному масштабі, не руйнуючи екологічні системи та не виснажуючи природні ресурси», знову ж таки посилаючись на розуміння комісії з питань навколишнього середовища та розвитку [2]. Ще в цьому проєкті розглядали сталу мобільність за допомогою показників для трьох складових:

- захист довкілля;
- регіональний розвиток;
- економічна ефективність.

Автори дійшли висновку, що екологічний вимір найбільше залежить від змін у транспортній системі, тоді як регіональний розвиток та економічна ефективність, по-перше, значною мірою залежать від розвитку поза транспортною системою, і, по-друге, вони більше пов'язані з тим, наскільки добре працює певна транспортна система, ніж з тим, як вона спроектована. Але якщо з першим твердженням погодитись можна, то з другим ні - бо якби вплив транспорту на економічний вимір був незначним, тоді для чого було б оцінювати економічні аспекти сталої мобільності. На рисунку 2 зображено

взаємозв'язок між економічною ефективністю, регіональним розвитком та захистом навколишнього середовища.

Подальшим кроками для дослідження сталої мобільності було визначення, які впливи зможуть покращити стан навколишнього середовища. Для зменшення негативного впливу продукту чи процесу на навколишнє середовище, було розширено концепцію під назвою - «екоінновація». Зокрема, суть екоінновацій полягає в тому, що вони звертають увагу на позитивний внесок, який промисловість може зробити у сталий розвиток та конкурентоспроможну економіку [8].

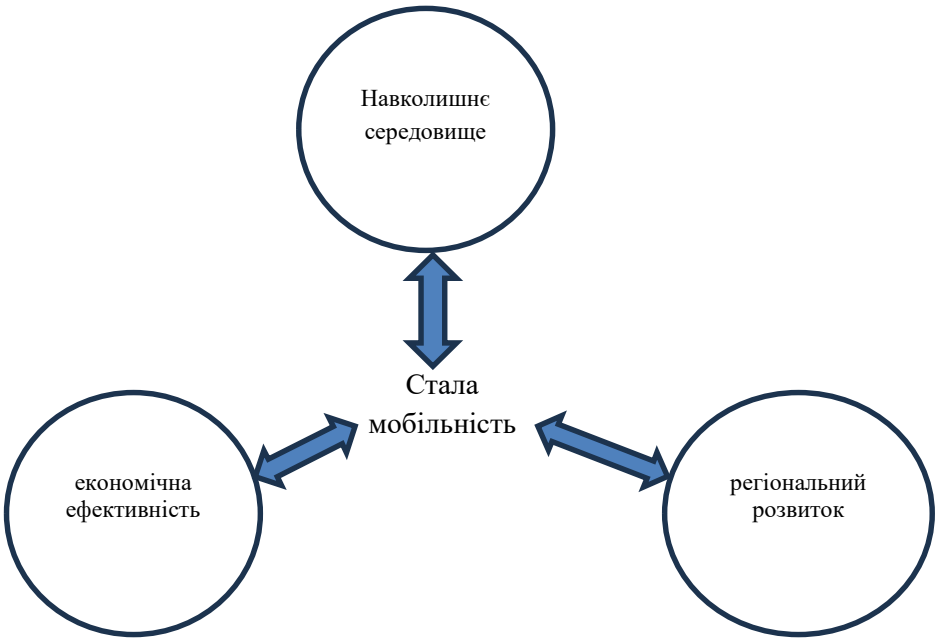


Рисунок 2 – Взаємозв'язок між економічною ефективністю, регіональним розвитком та захистом навколишнього середовища

Figure 2 – Relationship between economic eficiency, regional development and environmental protection

Більш детальне визначення наведено в [9], в якому екоінновації визначено як «виробництво, засвоєння або експлуатацію продукту, виробничого процесу, послуги чи методу управління чи бізнесу, що є новим для організації (яка його розробляє або впроваджує) та який протягом усього життєвого циклу призводить до зменшення екологічного ризику, забруднення та інших негативних наслідків використання ресурсів (включаючи використання енергії) порівняно з відповідними альтернативами».

Основними позиціями екоінновацій для транспорту є:

- встановлення показників викидів CO2;
- створення, дотримання та покращення стандартів викидів для дорожніх транспортних засобів;
- вуглецево-нейтральне паливо;
- збільшення частки електромобілів не тільки на особисті транспортні засоби а й для перевезення пасажирів й вантажів;
- відродження ходьби та їзди на велосипедах;
- створення більше зелених місць у містах.

Три основні екологічні інновації зосереджені на вантажних перевезеннях: еко-водіння (екодрайвінг) та системи управління експлуатацією, кооперативна логістика та інтермодальні та

мультимодальні вантажні перевезення. Їх впровадження значною мірою залежить від адаптації процесів у галузі.

Для обмеження та зменшення негативного впливу викидів токсичних речовин у транспортній сфері застосовується багато різних програм та заходів. Розглянемо одну з інновацій яка допомагає зменшити негативний вплив викидів у транспортному секторі таку як еко-водіння. Еко-водіння або як ще його називають Екодрайвінг часто використовується для позначення роботи автомобіля, яка мінімізує споживання енергії. Однак, для того, щоб еко-водіння було екологічно чистим, слід враховувати не лише споживання палива, а й викиди забруднюючих речовин та вплив на зовнішнє середовище. Плавність водіння означає підтримку відносно постійної швидкості на відміну від частих прискорень і уповільнень, які притаманні умовам міст та населених пунктів. Еко-стиль водія транспортного засобу – це стиль водіння, який мінімізує частоту та величину фаз прискорення та уповільнення та спрямований на використання постійної швидкості з економією палива. А агресивний стиль водіння – навпаки, характеризується частими та екстремальними періодами прискорення та уповільнення, а також невідповідно високими швидкостями для тих умов. Таким чином, екологічне водіння забезпечує системний підхід до зниження викидів в міських умовах. [10].

Вибір маршруту також може вплинути на економію палива внаслідок змін швидкості та рельєфу. Що стосується мінімізації споживання палива, оптимальним є маршрут, який дозволяє подорожувати з постійною економічною швидкістю та зменшує потребу в прискоренні та сповільненні. Для цього в умовах міста потрібно уникати перевантажені дороги і маршрути із частими сигналами світлофорів, перехрестями та пішохідними переходами. Подорож дорогами з великою кількістю заторів створює більше можливостей для виникнення ДТП і зіткнень транспортних засобів, оскільки транспортні засоби, які виїжджають на проїжджу частину та з'їжджають з неї, часто сповільнюють рух наскрізного трафіку. Різниця в швидкості між наскрізним трафіком і трафіком, що зливається, може збільшити ризик зіткнення. Крім того, маршрути з багатьма кривими або крутими схилами менш бажані через необхідність уповільнювати швидкість, щоб утримати смугу руху, і підвищену потребу в паливі для підйому вертикальних кривих і позитивних ухилів [10, 11, 12].



Рисунок 3 – Вплив Екодрайвінгу на зовнішнє середовище
Figure 3 – Impact of Ecodriving on the environment

Таким чином, відповідно світового досвіду екодрайвінг є перспективою у розробці системного підходу до зниження викидів від автотранспортних засобів в населених пунктах, що відповідає розвитку їх сталих ініціатив.

Висновки. Можна відмітити, що існує багато проектів та програм сталої мобільності. В дослідженні розглянуто екологічні інновації, що сприяють сталому розвитку мобільності, такі – що відносяться до транспортної політики та поступового вдосконалення транспортних технологій, і такі – що спричиняють зміни транспортних технологій та транспортної системи в цілому. Застосування технологій екологічного водіння може призвести до підвищення екологічної безпеки та економії палива, а також зменшить негативний вплив викидів токсичних речовин у транспортній сфері. В перспективі досліджень доцільно запропонувати методологію застосування екодрайвінгу в містах та створити структуровану стратегію для навчальних ініціатив, спрямованих на вдосконалення підходів економічного водіння, що сприятиме концепції сталого розвитку міст та регіонів.

Перелік посилань

1. Schade, W. (2005). Strategic Sustainability Analysis: Concept and application for the assessment of European Transport Policy. NOMOS-Verlag. Baden-Baden. Germany ISBN: 3-8329-1248-7 https://www.researchgate.net/publication/257944535_Strategic_Sustainability_Analysis_Concept_and_Application_for_the_Assessment_of_European_Transport_Policy

2. Report of the World Commission on Environment and Development Our Common Future United Nations 1987 383 P. ISBN:019282080X. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf

3. World Business Council for Sustainable Development (2004). Sustainable Mobility Project – Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability. Project Flyer https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2024/06/View-Executive-Summary-ENG.pdf.

4. Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability (Overview 2004) https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2024/06/Mobility2030-Overview.pdf

5. OECP (1996), Економічний огляд OECP, том 1996, випуск 1 , видавництво OECP, Париж, https://doi.org/10.1787/eco_outlook-v1996-1-en .

6. Schade Wolfgang, Rothengatter Werner Sustainable Mobility - Economic Aspects https://www.researchgate.net/publication/259364023_Sustainable_Mobility-Economic_Aspects
DOI: 10.2861/13430

7. Assessing the complementarity of common transport policy objectives. A scenario approach Rienstra S.A., Stead D., Banister D., Nij kamp P https://research.vu.nl/ws/portalfiles/portal/575477/19970070.pdf

8. Organisation for Economic Co-operation and Development (2009). Sustainable Manufacturing and Eco-innovation: Framework, Practices and Measurement. Synthesis Report. Paris. https://sostenibilidadyprogreso.org/files/entradas/43423689.pdf

9. Anthony Arundel and René Kemp Measuring eco-innovation Maastricht 2009 https://kemp.unu-merit.nl/Arundel%20and%20Kemp%202009-017.pdf

10. Дмитриченко А.М. Артемчук Ю.В. Системні підходи еководіння для зниження викидів в міських умовах. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Київ, 2024. Вип. 116.2. С. 209 - 215. DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.2-209-115

11. Robyn D. Robertson, Milad Delavary, Craig Lyon, Ward Vanlaar Effect of eco-driving on commercial motor vehicle driver collision risk Journal of Safety Research Volume 89, June 2024, Pages 190-196 https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.02.013

12. American Association of State highway and Transportation officials - highway safety manual 2010 1203 P. ISBN: 978-1-56051-477-0 https://www.scribd.com/document/678082230/AASHTO-Highway-Safety-Manual-1E-2010

SYSTEMIC APPROACHES TO SUSTAINABLE MOBILITY IN URBAN SETTINGS

Yuliia Artemchuk V., National Transport University, Department of Transport Systems and Traffic Safety, Assistant, e-mail: art_julia@i.ua, тел.: +380636047172; id ORCID: https://orcid.org/0000- 0002-3872-7745

Abstract

The main objective of this study is to consider and analyze environmental innovations that contribute to the sustainable development of mobility, which either relate to transport policy and the gradual improvement of transport technologies, or belong to the group of innovations that cause changes in transport technologies and the transport system as a whole, to reduce emissions in urban conditions.

Keywords. Sustainable development, sustainable mobility, environmental innovations, transport policy, ecodriving.

References

1. Schade, W. (2005). Strategic Sustainability Analysis: Concept and application for the assessment of European Transport Policy. NOMOS-Verlag. Baden-Baden. Germany ISBN: 3-8329-1248-7 https://www.researchgate.net/publication/257944535_Strategic_Sustainability_Analysis_Concept_and_Application_for_the_Assessment_of_European_Transport_Policy

2. Report of the World Commission on Environment and Development Our Common Future United Nations 1987 383 P. ISBN:019282080X. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf

3. World Business Council for Sustainable Development (2004). Sustainable Mobility Project – Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability. Project Flyer https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2024/06/View-Executive-Summary-ENG.pdf.

4. Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability (Overview 2004) https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2024/06/Mobility2030-Overview.pdf

5. OECP (1996), Економічний огляд OECP, том 1996, випуск 1 , видавництво OECP, Париж, https://doi.org/10.1787/eco_outlook-v1996-1-en .

6. Schade Wolfgang, Rothengatter Werner Sustainable Mobility - Economic Aspects https://www.researchgate.net/publication/259364023_Sustainable_Mobility-Economic_Aspects
DOI: 10.2861/13430

7. Assessing the complementarity of common transport policy objectives. A scenario approach Rienstra S.A., Stead D., Banister D., Nij kamp P https://research.vu.nl/ws/portalfiles/portal/575477/19970070.pdf

8. Organisation for Economic Co-operation and Development (2009). Sustainable Manufacturing and Eco-innovation: Framework, Practices and Measurement. Synthesis Report. Paris. https://sostenibilidadyprogreso.org/files/entradas/43423689.pdf

9. Anthony Arundel and René Kemp Measuring eco-innovation Maastricht 2009 https://kemp.unu-merit.nl/Arundel%20and%20Kemp%202009-017.pdf

10. Дмитриченко А.М. Артемчук Ю.В. Системні підходи еководіння для зниження викидів в міських умовах. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Київ, 2024. Вип. 116.2. С. 209 - 215. DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.2-209-115

11. Robyn D. Robertson, Milad Delavary, Craig Lyon, Ward Vanlaar Effect of eco-driving on commercial motor vehicle driver collision risk Journal of Safety Research Volume 89, June 2024, Pages 190-196 https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.02.013

12. American Association of State highway and Transportation officials - highway safety manual 2010 1203 P. ISBN: 978-1-56051-477-0 https://www.scribd.com/document/678082230/AASHTO-Highway-Safety-Manual-1E-2010

УДК 339.138
UDC 339.138

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-375-386

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ПРОЕКТУВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ ПАСАЖИРСЬКИХ СПОЛУЧЕНЬ Й МОДЕРНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ НИМИ

CONCEPTUAL PRINCIPLES OF DESIGNING LOGISTICS SYSTEMS OF PASSENGER CONNECTIONS AND MODERNIZATION OF THEIR MANAGEMENT PROCESSES



Мельниченко Олександр Іванович, *Заслужений працівник освіти України, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: melnichenko@ntu.edu.ua,*

http://orcid.org/0000-0001-9694-9824



Ігнатенко Олександр Семенович, *Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, Київ, Україна, e-mail: ignatenco@gmail.com,*

https://orcid.org/0000-0002-9460-6155



Дерегуз Ігор Андрійович, *Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: dereguz1998@ukr.net,*

http://orcid.org/0000-0003-3119-3709

Анотація. В статті досліджуються вихідні засади , що визначають стратегію, використання сукупності загальновизнаних на даному етапі розвитку науки взаємозалежних наукових досягнень, наукових теорій і відповідних їм правил, стандартів, методів наукових досліджень щодо логістичного управління сферою транспортних послуг для населення. Систематизовано можливості організації прозорого та ефективного процесу надання транспортних послуг населенню у відповідності з стандартами й регламентами, управління на основі поєднання системного, процесного, ситуаційного та історичного підходів менеджменту. Це породжує виразність відносин між надавачем та споживачем, виключає суб'єктивний підхід до модернізації технологій надання послуг, що сприяє раціональному використанню ресурсів та мінімізації ступеня соціальної напруги в суспільстві.

Об’єкт дослідження – відносини, пов'язані з проектуванням логістичних систем пасажирських сполучень й модернізацією процесів управління ними

Мета роботи – узагальнення концептуальних засад проектування логістичних систем пасажирських сполучень й модернізації процесів управління ними, а також розроблення методичних та науково-практичних рекомендацій за цим напрямом. Здійснені теоретичні дослідження важливі для удосконалення, вироблення нової моделі реформування системи транспортного обслуговування населення в Україні.

Методи дослідження – використано теоретичні конструкти «сервісної держави», адміністративного процесу та бізнес-процесів, окремі положення загальної теорії управління, теорії суспільного вибору, а також загальнонаукові та спеціальні методи пізнання: індукції та дедукції, методи аналізу та синтезу, деконструкції, абстрагування, системно-структурний підхід, методи порівняння, контент-аналіз.

Показано, що незважаючи на значимість прикладних дослідницьких устремлінь щодо досягнення якості та доступності як публічних послуг взагалі, так і транспортних послуг зокрема, ефективності їх надання, теоретичні засади, присвячені узагальненню засад проектування логістичних систем пасажирських сполучень й модернізації процесів управління ними у вітчизняній науці розроблено недостатньо. Встановлено, що розуміння місії, місця, ролі і можливостей логістики в транспортному обслуговуванні населення склалось в період 90-тих років ХХ ст. На цьому етапі була започаткована, а в подальшому визнана, необхідність застосування логістики в управлінні системами пасажирського сполучення щодо взаємопов´язаності й взаємодії учасників логістичних ланцюгів, зокрема в характерному складі це «замовник – перевізник - надавач супутніх послуг - споживач» у взаємозв´язку складових етапів обслуговування. Проектування логістичних систем пасажирських сполучень й модернізація процесів управління ними розглядалось з позицій ефективності формулювання стратегії, планування, управління і контролю за переміщенням потоків різної природи від пункту їх виникнення до кінцевого пункту використання (споживання) з метою найефективнішого пристосування та задоволення потреб споживача.

Доведено, що сучасна концепція проектування логістичних систем пасажирських сполучень й модернізації процесів управління сферою послуг має спрямовуватись на оптимізацію руху потоків ресурсів різного виду, зокрема людських, матеріальних і технічних. Сформульовані принципи та правила логістики в пасажирських сполученнях. Засади логістичного управління сферою транспортних послуг для населення мають враховувати, що надавач послуг є суб'єктом господарської діяльності, яка характеризується значною витратою різних ресурсів. З позиції логістики, управлінню сферою транспортних послуг притаманна система логістичних ланцюгів в залежності від видів сполучень з доставки пасажирів й логістичних каналів, що потребує їх оптимізації. Необхідно здійснювати аналіз типів реакції споживачів послуг на порушення технологій обслуговування. Цим пояснюється очевидна доцільність проведення логістичного аудиту. Важливим є побудова та функціонування інформаційних потокових системи, що пов'язують структурні відносини між учасниками ланцюгів надання послуг у єдине ціле.

За концептуальним підходом будова логістичних систем транспортних послуг для населення має відображати закономірності розвитку економіки: посилення міжгалузевих та міжсекторальних, а також міждержавних та міжрегіональних зв'язків; прискорення процесів інформатизації, упорядкованості, інтелектуалізації сфери послуг; зростанням значущості інновацій та інноваційного управління; протидію посиленню позицій тіньової економіки.

Результати досліджень можуть бути рекомендовані до впровадження транспортним підприємствам й організаціям, місцевими органам публічного управління для підвищення рівня надання транспортних послуг населенню України.

Ключові слова: логістика, види пасажирських сполучень, якість та доступність послуг, переміщенням населення, задоволення потреб споживача, потоки різної природи, процес інформатизації, інтелектуалізація сфери послуг.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сьогодні з впевненістю можна стверджувати, що прагнення держав, орієнтованих на зміцнення демократичних принципів, дедалі більше зміщуються у бік якісного розвитку сфери надання публічних послуг, до якої відносяться й транспортні послуги. Вочевидь це пов'язано з тим, що досконалість процесів надання послуг та їх результативність є критерієм оцінки публічного управління взагалі. Звідси питання покращення процесу надання транспортних послуг в різних видах сполучень висуваються на рівень стратегічних завдань сучасної держави [23, С. 27].

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю вирішення проблем організації прозорого та ефективного процесу надання транспортних послуг населенню у відповідності з чіткими стандартами й регламентами, проектування логістичних систем пасажирських сполучень й управління ними на основі поєднання системного, процесного, ситуаційного та історичного підходів менеджменту. Це не тільки породжує виразність відносин між надавачем та споживачем, а й виключає суб'єктивний підхід при модернізації технологій надання послуг, що сприяє раціональному використанню ресурсів та мінімізації ступеня соціальної напруги в суспільстві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми свідчить, що термін «логістика», відомий донедавна лише вузькому колу фахівців, набуває сьогодні значного поширення і в більшості визначень інтерпретується як майстерність підраховувати, міркувати. Так, ще за часів Римської імперії існували спеціальні службовці «логісти» або «логістики», які займалися розподілом й доставкою продуктів харчування [3, С.44].

Важливі для аналізу й відомі факти використання логістики у військовій справі, де багаторічним досвідом доведена можливість оптимізації управління людськими та матеріальними потоками. Проблеми управління окремими видами вантажопотоків, і у цілому сервісною діяльністю на транспорті розроблялися багатьма дослідниками, серед авторів, у працях яких були висвітлені ці напрями, слід зазначити таких вчених, як Б. О.Анікін, Т.А.Воркут, М. Ф. Дмитриченко, Л. Г. Зайончик, А. Г. Кальченко П.Р. Левковець, І. М. Статник, О. П.Тяпухин, А. М. Ткаченко, Р.А.Хабутдінов та інших [1, 6, 11]. Проте слід звернути увагу, що дані дослідження в значній мірі засновані на вивченні та використанні зарубіжного досвіду логістичного управління.

Лише останнім часом з´явились спроби використання логістики до проектування й організації систем обслуговування населення та управління потоками послуг в інших економічних адаптивних системах із синергічними зв'язками [9, С. 55]. При цьому проектування, організація та управління розглядається як сукупність функцій, процедур і дій, що орієнтовані на досягнення певної мети. Тобто, в загальних рисах таке управлінням пов´язане з низкою завдань, які вирішуються для досягнення заздалегідь поставленої мети. Незважаючи на значимість прикладних дослідницьких устремлінь щодо досягнення якості та доступності як публічних послуг взагалі, так і транспортних послуг зокрема, ефективності їх надання, теоретичні засади, присвячені вдосконаленню процесів управління цією сферою, у вітчизняній науці розроблено недостатньо. Окремі аспекти в рамках дискусії з питання логістичного підходу до транспортного обслуговування населення останнім часом розглядалися в роботах П.М.Арімбекової, О.А.Біловодської, М.Ю.Григорака, І.В.Грицука, Н.М.Зубар, В.С.Марунича, М.С.Ізтелеузової, Є.В.Крикавського, Н.В.Чорнописького та інших [4, 9, 10].

На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що проектування, організація та управління логістичними системами й процесами у сфері послуг для населення функціонально взаємопов´язані і залежать від ефективності формулювання стратегії, технологій планування, управління та контролю за переміщенням потоків різної природи від пункту їх виникнення до кінцевого пункту використання (споживання) з метою найефективнішого пристосування та задоволення потреб споживача. Погляди щодо диверсифікації напрямів різнопланового використання логістики відстоюються М.П. Денисенком, Л.Я. Малютою, Р.П. Шерстюком [15,17].

Загалом удосконалення засад проектування логістичних систем надання послуг й процесів управління ними є новим напрямом розвитку економіки України, що природно пояснює складність його реалізації і необхідність формування науково обгрунтованої концепції логістичного управління

кожною сферою, зокрема щодо транспортного обслуговування населення. Особливо важливі такі теоретичні дослідження для побудови нової моделі реформування системи пасажирських транспортних сполучень в Україні.

Мета статті – узагальнення концептуальних засад проектування логістичних систем пасажирських сполучень й модернізації процесів управління ними, а також розроблення методичних та науково-практичних рекомендацій за цим напрямом.

Для досягнення мети досліджено процеси надання транспортних послуг в системі пасажирських сполучень та можливості їх вдосконалення, відносини та взаємозв'язки у цій сфері, використано теоретичні конструкти «сервісної держави», адміністративного процесу та бізнес-процесів. Об´єктивності та обгрунтуванню отриманих результатів сприяло використання положень загальної теорії управління, теорії суспільного вибору, а також загальнонаукових та спеціальних методів пізнання: індукції та дедукції, методів аналізу та синтезу, декомпозиції, абстрагування, системно-структурного підходу, методів порівняння та контент-аналізу.

Виклад основного матеріалу. На підставі проведеного аналізу проектування логістичних систем пасажирських сполучень й модернізації процесів управління ними**,** як міждисциплінарний напрям досліджень, можна віднести до порівняно молодої науки, яка називається сервісологією [14, С. 25; 16, С. 39]. Спеціальні наукові знання, присвячені сутнісним особливостям публічних послуг, розвиваються й в інших галузях наук. Крім того, поняття «транспортна послуга» останнім часом знаходиться у центрі нормотворчої діяльності. Звідси, уявлення про транспортні послуги досить різноманітні і це впливає на концептуальні підходи до логістичного управління цією сферою.

Визначальними в дослідженні вважались загальні вихідні положення, які суттєво впливають на рівень усвідомлення місця і ролі логістики в управлінні переміщенням населення. Зокрема, за історичним підходом менеджменту, цей шлях пролягає через еволюцію концепцій класичної логістики, які можна адаптувати до обраного напряму досліджень. Скористаємось відомими результатами періодизації щодо виникнення та розвитку логістики: етапи, періоди, їх характеристика [13, С. 53-56; 21, С. 61-65].

Зокрема, за етапом зародження логістики XIV ст. до н. е. – I ст. н. е., розроблено елементарні методи планування маршрутів та керування переміщенням в матеріально-технічному постачанні, що в значній мірі можна віднести до початкових стадій зародження думки щодо проектування та управління транспортним обслуговуванням населення.

З наступного етапу (I тисячоріччя нашої ери – кінець XIX ст.), який свідчить про застосування логістики у військовій справі, до сфери транспортного обслуговування населення можуть адаптуватись погляди щодо практичного мистецтва управління перевезеннями, їх планування, комплексного підходу до організації забезпечення.

Про доцільність розповсюдження логістики у різних сферах господарської діяльності потокової структури в умовах ринку, якою є й транспортна діяльність, свідчить її розвиток на етапі 1900 – 1950 роки XX ст. В цей період увага концентрувалась на формуванні злагодженого механізму проектування логістичних систем й процесів управління потоком вироблених товарів, на вивченні і трансформуванні процесів й операцій, пов'язаних із переміщенням ресурсів у просторі та за часом.

Зародження логістичних технологій управління транспортним обслуговуванням населення можна пов´язати з періодом 80-тих років XX ст., який характеризується змінами в державному регулюванні економіки транспорту; поширенням філософії загального управління якістю; зростанням партнерства в наданні послуг транспорту, а також визнанням невіддільності потреб споживачів і мети бізнесу.

Визначальним для розумінні місії, місця, ролі і можливостей логістики в транспортному обслуговуванні населення можна вважати етап 90-тих років XX ст., коли зміцнення глобалізаційних чинників сприяло трансформації концепцій логістики щодо підтримки процесів інтеграції, диверсифікації у її використанні. Саме в цей період була започаткована, а в подальшому визнана,

необхідність застосування логістики в проектуванні та управлінні системами транспортного обслуговування населення щодо взаємопов´язаності й взаємодії учасників логістичних ланцюгів, зокрема в характерному складі це «замовник – перевізник - надавач супутніх послуг - споживач», з виділення технологічної етапності за потоковими складовими транспортного обслуговування [7, С.].

Період з 2000 року по теперішній час є етапом подальшого розвитку логістики, який характеризується зміцненням як глобалізаційних процесів в світовій економіці, так і використанням досягнень науково-технічної революції, що породжує нові потреби й трансформує вимоги населення в сфері транспортного обслуговування. Зокрема, це широкий розвиток міжнародного пасажирського сполучення, підвищення надійності й комфортності внутрішніх пасажирських систем надання послуг, використання більш досконалих транспортних засобів й обладнання, удосконалення інформаційних систем та систем оплати проїзду, підвищення альтернативності та якості надання транспортних послуг, супутнього обслуговування та інше.

Більшою мірою дискусії в сфері транспортної діяльності із здійснення пасажирських сполучень пов'язані із особливостями сприйняття сутності транспортної послуги для населення і це важливо для визначення концептуальних підходів до проектування й логістичного управління такою системою. Приводом для цього слугували різні аспекти. Одним із головних виступає характер процесу надання послуг для населення. Так, вузьке сприйняття транспортних послуг пов'язане з індивідуалізованим характером їх надання, коли потреба в послугах залежить від ініціативи їх споживача. Широкий підхід, крім індивідуального, охоплює також спосіб надання транспортних послуг, в умовах якого вони безперервно впливають на все суспільство як єдиний соціальний організм. Ці обставини мають враховуватись при проектуванні логістичних систем пасажирських сполучень й модернізації процесів управління ними на основі моделювання ринку транспортних послуг, засобів та інфраструктури обслуговування.

Широке розуміння транспортних послуг для населення притаманне дослідженням як в Україні, так в країнах ЄС, де вони ототожнюються з палітрою публічних послуг, що надаються в суспільстві [22, С. 10; 24, с. 14640]. Зокрема, результати досліджень, проведених під керівництвом В. М. Бабаєва свідчать, що усвідомлення сфери транспортного обслуговування населення пов'язане з «розумінням «сервісної» концепції держави… сенс і призначення держави полягають у служінні особистості, і, при її буквальному тлумаченні, практично будь-яка діяльність особистості чи суб´єкта господарювання щодо взаємодії з особистістю відносно здійснення пересування називається транспортною послугою» [2, С. 21]. Звідси, крім наданих послуг за індивідуальними та колективними потребами, необхідно також розглядати транспортні послуги, в яких зацікавлене все суспільство.

Нині учені вже не сумніваються у тому, що процеси сервізації стають важливим чинником зростання якості життя всіх рівнях управління економікою [19, С. 41]. Сервізація економіки перетворилась в глобальну закономірність розвитку сучасного суспільства на всіх рівнях управління: населений пункт, регіон, держава, міждержавний рівень. І результативність такої сервізації залежить від рівня проектування логістичних систем пасажирських сполучень й процесів управління ними. Оскільки більшість публічних послуг пов´язана з використанням транспорту.

Детально не аналізуючи ті чи інші нюанси різних тлумачень логістики, варто зауважити, що сьогодні вже немає сумніву в тому, що логістичне управління сферою транспортних послуг для населення, на відміну від матеріально-технічного забезпечення, є теорією й практикою проектування логістичних систем та управління потоковими процесами: потоками різноманітних послуг в системі обслуговування та ресурсів. Тобто, це теорія та практика управління соціально-економічними системами у вигляді раціоналізації потокових процесів у межах цих систем.

Таким чином, сучасна концепція проектування логістичних систем пасажирських сполучень й модернізації процесів управління ними має спрямовуватись на оптимізацію руху потоків ресурсів різного виду, зокрема людських, матеріальних і технічних [9. С. 65]. І поняття «логістичне управління сферою транспортних послуг для населення» виходить за рамки управління тільки товарно-матеріальними цінностями, а матеріальний потік далеко не основний, визначальний предмет управління в досліджуваній логістичній системі. Саме логістика пасажирських сполучень відображає

управлінські аспекти руху будь-яких потоків послуг й ресурсів для населення, їх оптимізацію, зокрема таких ресурсів, як: інформаційні, кадрові, комунікаційні, фінансові, інноваційні та інших.

Відомо, що будь-якому потоку характерна безперервність, упорядкованість, цілеспрямованість руху. У окремих дослідженнях логістичних потоків робляться спроби показати можливість відносної деформації безперервності руху на будь-яку дискретну форму [24, С. 14645]. Наведену характеристику потоку сформульовано відповідно до так званого енергетичного бачення природи потокових процесів, відповідно до якого «структура всіх штучних потоків єдина і є взаємодією трьох субстанцій матерії: «речовини», «енергії» та «інформації»; вид потоку визначається лише тим, яка з трьох субстанцій матерії піддається цілеспрямованому та впорядкованому впливу чи управлінню; відсутність однієї з трьох компонентів (субстанцій) матерії унеможливлює виникнення або функціонування будь-якого потоку як керованого процесу; процес створення благ та їх розподілу, як потоковий процес, є цілеспрямований і впорядкований рух «транспортних послуг – переміщення населення», яке здійснюється завдяки руху потоків транспортних засобів, потоків «енергії – використання пально-мастильних матеріалів, електроенергії» і «інформації – для населення і щодо використання транспортних ресурсів» [24, С. 14639]. Тобто, всі наведені субстанції мають місце в логістичній системі надання транспортних послуг населенню і мають концептуально враховуватись.

У зв'язку з тим, що послуги позбавлені будь-якого матеріально-речового змісту, їх неможливо зберігати на складі, традиційно транспортувати, торгувати ними у формах адекватно торгівлі матеріальними продуктами тощо. Послуги нерозривні у наданні-споживанні і на них поширюється своєрідність майнових правовідносин, вони неподільні [20, С. 67]. Розглянуті основні властивості послуг визначають як зміст та особливості теорії й практики логістики у сфері транспортного обслуговування населення, так і стосується концепції проектування логістичних систем пасажирських сполучень й процесів управління цією сферою.

Аналіз свідчить, що не можна моделі та методи транспортної, складської логістики, логістики запасів тощо у матеріальному виробництві застосовувати у сфері транспортних послуг для населення. Однак загальні принципи та правила логістики повною мірою поширюються на цю сферу [3, С.67; 4, С.49]. Уточнимо останню обставину.

1. Послуга має бути спожита (і при цьому не завжди надається традиційним ринковим чином) конкретним споживачам.

2. Надана послуга має бути належної якості.

3. Комплексна послуга має бути надана у необхідному обсязі (тобто, мати певну споживчу вартість).

4. Послуга має бути надана у певних просторових межах та межах часу.

5. Послуга має бути надана з мінімальними витратами.

У зв'язку з тим, що некомерційна діяльність у сфері транспортних послуг для населення займає значне місце, доцільно говорити не лише про комерційну, а й про некомерційну логістику, яка, на жаль, практично не досліджується фахівцями. Некомерційна логістика управління соціально-економічними транспортними системами, що мають некомерційний статус, або некомерційною складовою цих систем має опікуватись питаннями раціоналізації потокових процесів, що протікають в них не на ринковій основі. Як приклад, надання транспортних послуг пільговим категоріям пасажирів розповсюджується на: інвалідів війни I, II, III груп; учасників бойових дій, учасників війни, учасників ліквідації аварії на Чорнобильській АЕС I та II категорій з посвідченням серії “А, дітей віком від 6-ти до 14-ти років та інші.

При формуванні засад проектування логістичних систем пасажирських сполучень й модернізації процесів управління ними слід враховувати, що надавач послуг є суб'єктом господарської діяльності, яка характеризується високою матеріало- і фондомісткістю [18. С. 56-59]. Зокрема, перевізники нерідко споживають значні обсяги матеріально-технічних ресурсів, номенклатура яких може перевищувати тисячі найменувань позицій. І постачання й використання таких ресурсів має потокову природу. Водночас, у процесі ведення господарської діяльності транспортні підприємства й організації сфери послуг експлуатують основні фонди - будівлі та споруди, обладнання загального та

спеціального призначення, меблі, засоби інформатизації, зв'язку та телекомунікацій, аудіо- та відеотехніку, оргтехніку, транспортні засоби, засоби дизайну, інші види основних фондів. Мають велике значення у діяльності суб'єктів господарювання сфери транспортних послуг й оборотні фонди — паливо та електроенергія, запчастини та комплектуючі вироби, інвентар та інструмент, електро- та світлотехнічна продукція, хімічна продукція, лакофарбові матеріали, будівельні матеріали, пиломатеріали та столярні вироби, чорні та кольорові метали і металовироби, тканини, папір і картон та інше. Усе це підтверджує думку про актуальність розвитку підходів до проектування логістичних систем й процесів логістичного управління супутніми процесами сфери послуг у частині традиційного підходу до логістики: на практиці логістика транспортних послуг має бути пов'язана безпосередньо з проектуванням, організацією, технологією та економікою забезпечення господарського процесу підприємства.

За сутністю логістичне управління сферою транспортних послуг для населення має передбачати мінімізацію логістичних витрат [5, С. 82]. За системним підходом менеджменту це може досягатись, зокрема, за рахунок:

- аналізу управлінської та господарської діяльності учасників логістичного ланцюга надання транспортних послуг;
- координації функціональних циклів логістики послуг;
- упорядкування технології взаємодії учасників ланцюга надання транспортних послуг;
- запровадження логістичного бенчмаркінгу.

З позиції логістики, управлінню сферою транспортних послуг притаманна система логістичних ланцюгів в залежності від видів сполучень з доставки пасажирів й логістичних каналів, що потребує оптимізації [8, С. 221; 12, С. 116].

Дослідження свідчать, що в аналізі загальної ефективності функціонування ланцюга надання послуг слід звернути увагу на такі діагностичні показники:

- частка замовлень на транспортні (основні та додаткові) послуги, виконаних відповідно до встановленого стандарту (регламенту, терміну);
- середні фактичні витрати на супутнє обслуговування;
- тривалість реакції на претензії споживачів послуг та їх задоволення (середній термін між надходженням скарг та контактом з відповідальним представником надавача послуг);
- тривалість задоволення претензій споживачів послуг.

Виключно актуальною у формуванні засад проектування логістичних систем пасажирських сполучень й модернізації процесів управління ними є необхідність визначення функціональних зон у цій сфері. Зокрема, слід звернути увагу на:

– моніторинг надання логістичних гарантій обслуговування;
– логістичну координацію дій учасників ланцюга надання послуг, спрямовану на швидке реагування стосовно зростання вимог до рівня логістичного обслуговування;
- логістичний аудит каналів обслуговування пасажиропотоків (особливо у разі масового попиту).

З позиції концептуального підходу до проектування логістичних систем й процесів управління сферою послуг необхідно здійснювати аналіз типів реакції споживачів послуг на порушення технологій в обслуговуванні. Виходячи з того, що у споживача послуги після початку процесу її надання часто відсутня можливість відмовитись від послуги, слід особливу увагу приділяти питанням відстеження та роботи зі скаргами споживачів транспортних послуг. Цим пояснюється очевидна доцільність проведення логістичного аудиту.

Іншим важливим питанням управління потоковими процесами у сфері транспортних послуг для населення є проектування логістичних каналів надання послуг. До них слід віднести:

– вивчення можливостей задоволення потреб споживачів послуг;
– визначення логістичної позиції надавача послуги;
– аналіз раціонального споживання надавачем послуги логістичних ресурсів;

– розробка логістичної стратегії замовника та надавача послуги відповідно до їх основних цілей діяльності;

– вибір маркетингової стратегії надавача основних та додаткових послуг;

– дослідження системи обслуговування споживачів послуги;

– аналіз структурних складових системи логістичного обслуговування;

– вивчення складу та структури логістичних витрат;

– формування логістичного бюджету в цілому для здійснення всього процесу надання послуг;

– розвиток нормотворчості та раціоналізація документообігу в ланцюгах надання послуг та ін.

Проектування та управління логістичними ланцюгами надання послуг потребує узгодження договірних відносин між усіма їх учасниками. У зв'язку з цим є необхідність розробки відповідних рекомендацій, що враховують специфіку конкретного виду пасажирських сполучень.

Актуальним питанням є створення інформаційних потокових системи, що пов'язують структурні відносини між учасниками ланцюгів надання послуг у єдине ціле. Це стає реальним під час створення інтегрованої системи логістичної підтримки процесу надання транспорних послуг, відповідних інформаційних, фінансових та інших потоків.

Зокрема, за концептуальним підходом впровадження логістичних інформаційних технологій у сфері транспортних послуг для населення дозволяє:

– створити систему управлінського обліку формування, просування та реалізації транспорних послуг в логістичній системі;

– скоротити «тривалість очікування» споживачами надання послуг на всіх етапах обслуговування, складних за структурою;

– підвищити якість супутнього обслуговування споживачів;

– забезпечити своєчасне надання необхідної допомоги як надавачам, так і споживачам послуги у разі виникнення кризових ситуацій, вирішити інші завдання.

Висновки і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Підбиваючи підсумки зазначимо, що логістичне управління у сфері транспортних послуг для населення відноситься до важливих галузей логістики. Процеси проектування й конкретизації логістичних систем транспортних послуг для населення та їх функціонування за видами пасажирського сполучення мають здійснюватись у відповідності з підходами теорії та методології загальної логістики. Поняття «логістика транспортних послуг для населення», «логістика суб'єктів господарювання сфери послуг» неоднозначні але взаємопов´язані.

Будова логістичних систем транспортних послуг для населення на сучасному етапі розвитку економіки мають відображати закономірності її розвитку: посилення міжгалузевих та міжсекторальних, а також міждержавних та міжрегіональних зв'язків; прискорення процесів інформатизації, упорядкованості, інтелектуалізації сфери послуг; зростанням значущості інновацій та інноваційного управління; протидію посиленню позицій тіньової економіки. Кожна із закономірностей може розглядатись як окрема сфера досліджень.

Правильне проектування, організація та управління процесами надання транспортних послуг передбачає підвищення ефективності, тобто скорочення витрат часу пасажирів та ресурсів, пов´язаних з обслуговуванням, підвищення існуючого рівня послуг чи зростання їх якості. Слід зазначити, що одна справа – правильний погляд та розуміння важливості й значення модернізації процесів й систем транспортного обслуговування населення, інша, мабуть, найскладніша – обрати шлях, визначити основні підходи, зорієнтуватись в механізмах й технологіях вдосконалення з врахуванням потокової природи практично усіх складових. І до управління практично будь яким потоком системи транспортного обслуговування населення доцільно застосовувати логістичний підхід. Тобто, є потік – є й підстави для логістичного управління таким потоком. Саме на це й спрямовані викладені основні положення результатів проведених досліджень.

У цій статті нами порушено лише загальні проблеми логістики у сфері транспортних послуг для населення загалом. Проте важливим моментом у формуванні концепції логістичного управління сферою послуг за видами пасажирських сполучень, зокрема міських, приміських, міжміських, міжнародних, легкових таксомоторних, є використання поряд з системним, ситуативним, історичним підходами, процесного підходу. За такої умови концепція набуває прикладного змісту.

Перелік посилань

1. Анікін Б. О. Комерційна логістика. Підручник. / Б. О.Анікін, О. П. Тяпухин – Київ: Центр учбової літератури. 2019. 432 с.
2. Бабаєв В.М. Організаційно-економічний механізм державної підтримки інноваційного розвитку національної економіки: монографія / В. М. Бабаєв, О. В. Димченко, В. О. Єсіна, О. О. Рудаченко, Ю. О. Тараруєв; Харків нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 63 с.
3. Бедрій Я.І. Основи логістики: навч. посіб. / Я.І.Бедрій, Є.М. Тарнавський – Київ: Центр учбової літератури. 2019. – 260 с
4. Біловодська О.А. Логістика: теорія та практика: навч. посіб. / О.А. Біловодська – Київ: Центр учбової літератури, 2018. 356 с.
5. Вольська О.М. Сучасні тенденції розвитку автотранспортної галузі України Монографія. / О.М.Вольська, В.В.Храпкіна, І.В. Грицук – Київ: "Олді+". 2020. – 144 с.
6. Дмитриченко М. Ф. Транспортні технології в системах логістики: підручник / М. Ф. Дмитриченко, П. Р. Левковець, А. М. Ткаченко, О. С. Ігнатенко, Л. Г. Зайончик, І. М. Статник. – К.: ІНФОРМАВТОДОР. 2007. 676 с.
7. Ігнатенко О. С. Пасажирські перевезення [Текст]: підручник / О. С. Ігнатенко, В. С. Марунич; Національний транспортний університет. Ч. 1. – Київ, 2017. 265 с.
8. Ігнатенко О. С. Пасажирські перевезення [Текст]: підручник / О. С. Ігнатенко, В. С. Марунич; Національний транспортний університет. Ч. 1. – Київ, 2017. 283 с.
9. Зубар Н.М. Логістика в ресторанному господарстві: навч. посіб. / Н.М.Зубар, М.Ю. Григорак– Київ: ЦУЛ, 2016. 312 с.
10. Ізтелеуова М.С. Організація та логістика перевезень. Підручник. / М.С.Ізтелеуова, І.В.Грицук, П.М. Арімбекова. – Херсон: "Олді+". 2021. – 264 с.
11. Кальченко А. Г. Логістика: підручник. / А. Г. Кальченко – Київ: КНЕУ, 2015. 284 с.
12. Крикавський Є.В. Інноваційна логістика: концепції, моделі, механізми: Монографія / [Є.В. Крикавський, Н.В. Чорнописька, М.Ю. Григорак та ін.] / За наук. ред. М.Ю. Григорак та Л.В. Савченко. – Київ: Логос, 2015. – 548 с.
13. Крикавський Є.В. Логістика для економістів: підручник. / Є.В. Крикавський – Львів: Львівська політехніка, 2015. 448 с.
14. Малюк Л.П. Сервісологія та сервісна діяльність: навч. посіб./ Л.П. Малюк, О.М. Варапаєв, А.В. Ціолковська. - Х.: ХДУХТ, 2009. - 211 с.
15. Малюта Л.Я. Логістика : курс лекц. / Л.Я.Малюта, Р.П. Шерстюк – Тернопіль: ТНТУ, 2017. 139с.
16. Мітал О.Г. Сервісологія: практ. посіб. / О.Г.Мітал, І.О. Петровська – Херсон: "Олді+". 2022. – 96 с.
17. Організація та проектування логістичних систем [Текст]: підручник / за ред. М. П. Денисенка, П. Р. Левковця, Л. І. Михайлової. – Київ : Центр навчальної літератури, 2018. 333 с.
18. Показники ефективності інвестицій автотранспортного підприємства: колективна монографія [(Г.В. Подвальна) та ін.] За ред. О.А. Паршиной. – Дніпропетровськ : «Герда», 2013. – Т.3. – 365 с.
19. Посилкіна О.В., Баєва О.І., Онищенко Я.Г. Економіка логістики: навч. посіб. / О.В.Посилкіна, О.І.Баєва, Я.Г. Онищенко – Харків: НФаУ, 2018. 251 с.

20. Хома І. Б. Формування процесів забезпечення економічної захищеності в системі антикризового управління: мікро- та макрорівень: монографія / І. Б. Хома, О. О. Бонецький, В. М. Кащишин, Р. М. Вороніна, О. С. Лемішовська. – Львів: Ліга-Прес, 2017. – 216 с.

21. Шандрівська О.Є. Логістичний менеджмент. Теоретичні основи: навч.– метод. посіб. / О.Є. Шандрівська– Львів: Львівська політехніка, 2014. 195 с.

22. Benaissa M., Benabdelhafid A. A multi-product and multi-period facility location model for reverse logistics // Polish journal of management studies. – 2010. – Vol.2 (1). – P. 7-19.

23. Connecting to Compete 2016: Trade Logistics in the Global Economy / Arvis J.- F., Saslavsky D., Ojala L. – Washington, DC : The World Bank, 2016. – X, 62 p.

24. Identification and simulation models in logistics control systems for production processes and freighting / A. Dolgui, N. Bakhtadze, R. Sabitov, G. Smirnova et al // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50 (1). P. 14638–14643.

CONCEPTUAL PRINCIPLES OF DESIGNING LOGISTICS SYSTEMS OF PASSENGER CONNECTIONS AND MODERNIZATION OF THEIR MANAGEMENT PROCESSES

Melnichenko Oleksand I., Honored Worker of Education of Ukraine, candidate of science in engineering, professor, National Transport University, Professor of the department Manufacturing, Repair and Materials Engineering, e-mail: melnichenko@ntu.edu.ua, tel. +38(050)6562446, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelianovycha-Pavlenka str. 1, orcid.org/0000-0001-9694-9824

Ignatenko Oleksandr S., Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, National Transport University, Professor, Professor of the Department of Transport Technologies, Kyiv, Ukraine, ignatenco@gmail.com, +38679059744, Ukraine, 01010, Kyiv, st. M. Omelyanovich-Pavlenko 1, orcid.org/0000-0003-0443-5469

Dereguz Igor A., aspirant of department transport law and logistic, National Transport University, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelianovycha-Pavlenka str. 1, dereguz1998@ukr.ne, +380677029831, orcid.org/0000-0003-3119-3709.

Abstract. The article examines the initial principles that determine the strategy, the use of a set of interdependent scientific achievements, scientific theories and their corresponding rules, standards, methods of scientific research regarding the logistics management of the field of transport services for the population, generally recognized at this stage of the development of science. Systematized the possibilities of organizing a transparent and effective process of providing transport services to the population in accordance with standards and regulations, management based on a combination of systemic, process, situational and historical management approaches. This gives rise to the expressiveness of the relationship between the provider and the consumer, excludes a subjective approach to the modernization of service delivery technologies, which contributes to the rational use of resources and the minimization of the degree of social tension in society.

The object of the study is relations related to the design of logistics systems of passenger services and the modernization of their management processes

The purpose of the work is to generalize the conceptual foundations of the design of logistics systems of passenger connections and the modernization of their management processes, as well as the development of methodological and scientific-practical recommendations in this direction. The conducted theoretical studies are important for improvement and development of a new model of reforming the public transport service system in Ukraine.

Research methods - the theoretical constructs of the "service state", administrative process and business processes, separate provisions of the general theory of management, the theory of social choice, as well as general scientific and special methods of cognition are used: induction and deduction, methods of analysis and synthesis, deconstruction, abstraction, systematic -structural approach, methods of comparison, content analysis.

It is shown that despite the importance of applied research efforts to achieve the quality and availability of both public services in general and transport services in particular, the efficiency of their provision,

theoretical principles devoted to the generalization of the principles of designing logistics systems of passenger services and the modernization of their management processes have not been sufficiently developed in domestic science . It was established that the understanding of the mission, place, role and possibilities of logistics in the transport service of the population was formed in the period of the 90s of the XX century. At this stage, the need to apply logistics in the management of passenger transportation systems was initiated, and later recognized, regarding the interconnection and interaction of participants in logistics chains, in particular, in a characteristic composition, it is "customer - carrier - provider of related services - consumer" in the relationship of components stages of service. The design of logistics systems of passenger connections and the modernization of their management processes were considered from the standpoint of the effectiveness of strategy formulation, planning, management and control over the movement of flows of various nature from the point of their origin to the final point of use (consumption) with the aim of the most effective adaptation and satisfaction of consumer needs.

It has been proven that the modern concept of designing logistics systems of passenger services and modernization of service management processes should be aimed at optimizing the flow of various types of resources, in particular human, material and technical. Formulated principles and rules of logistics in passenger services. The principles of logistics management in the field of transport services for the public must take into account that the service provider is a subject of economic activity, which is characterized by a significant consumption of various resources. From the point of view of logistics, the management of the field of transport services is characterized by a system of logistics chains depending on the types of connections for the delivery of passengers and logistics channels, which requires their optimization. It is necessary to analyze the types of reaction of service consumers to violations of service technologies. This explains the obvious expediency of conducting a logistics audit. It is important to build and operate information flow systems that connect structural relationships between participants in service provision chains into a single entity.

According to the conceptual approach, the structure of logistics systems of transport services for the population should reflect the patterns of economic development: strengthening inter-industry and inter-sectoral, as well as inter-state and inter-regional connections; acceleration of processes of informatization, orderliness, intellectualization of the service sphere; the growing significance of innovations and innovative management; countering the strengthening of the positions of the shadow economy.

Research results can be recommended for implementation by transport enterprises and organizations, local public administration bodies to increase the level of provision of transport services to the population of Ukraine.

Key words: logistics, types of passenger communications, quality and availability of services, population movement, satisfaction of consumer needs, flows of different nature, information process, intellectualization of the service sphere.

Refernces

1. Anikin B. O. Commercial logistics. Textbook. / B. O. Anikin, O. P. Tyapukhin - Kyiv: Center for Educational Literature. 2019. 432 p.

2. Babaev V.M. Organizational and economic mechanism of state support for innovative development of the national economy: monograph / V. M. Babaev, O. V. Dymchenko, V. O. Yesina, O. O. Rudachenko, Yu. O. Tararuev; Kharkiv National city university farm named after O. M. Beketova. – Kharkiv: XNUMX named after O. M. Beketova, 2022. - 63 p.

3. Bedrii Y.I. Basics of logistics: education. manual / Ya.I. Bedrii, E.M. Tarnavskyi - Kyiv: Center for Educational Literature. 2019. – 260 p

4. Bilovodska O.A. Logistics: theory and practice: education. manual / O.A. Bilovodska - Kyiv: Center for Educational Literature, 2018. 356 p.

5. Volska O.M. Modern trends in the development of the motor transport industry of Ukraine Monograph. / O.M. Volska, V.V. Khrapkina, I.V. Hrytsuk– Kyiv: "Oldi+". 2020. – 144 p.

6. Dmytrychenko M. F. Transport technologies in logistics systems: a textbook / M. F. Dmytrychenko, P. R. Levkovets, A. M. Tkachenko, O. S. Ignatenko, L. G. Zayonchyk, I. M. Statnyk . - K.: INFORMAVTODOR. 2007. 676 p.

7. Ignatenko O. S. Passenger transportation [Text]: textbook / O. S. Ignatenko, V. S. Marunych; National Transport University. Part 1. - Kyiv, 2017. 265 p.

8. Ignatenko Passenger transportation [Text]: textbook / O. S. Ignatenko, V. S. Marunych; National Transport O. S. University. Part 1. - Kyiv, 2017. 283 p.

9. Zubar N.M. Logistics in the restaurant industry: training. manual / N.M. Zubar, M.Yu. Hryhorak – Kyiv: TsUL, 2016. 312 p.

10. Izteleuova M.S. Organization and logistics of transportation. Textbook. / M.S. Izteleuova, I.V. Hrytsuk, P.M. Arimbekov. – Kherson: "Oldi+". 2021. – 264 p.

11. Kalchenko A.G. Logistics: a textbook. / A. G. Kalchenko – Kyiv: KNEU, 2015. 284 p.

12. Krykavskyi E.V. Innovative logistics: concepts, models, mechanisms: Monograph / [E.V. Krykavskyi, N.B. Chernopyshka, M.Yu. Hryhorak et al.] / For science. ed. M. Yu. Hryhorak and L.V. Savchenko. - Kyiv: Logos, 2015. - 548 p.

13. Krykavskyi E.V. Logistics for economists: a textbook. / E.V. Krykavskyi - Lviv: Lviv Polytechnic, 2015. 448 p.

14. Malyuk L.P. Service science and service activity: education. help./ L.P. Malyuk, O.M. Varapaev, A.V. Tsiolkovskaya - Kh.: KhDUHT, 2009. - 211 p.

15. Malyuta L.Ya. Logistics: lecture course. / L.Ya. Malyuta, R.P. Sherstyuk - Ternopil: TNTU, 2017. 139p.

16. Mital O.G. Service science: practice. manual / O.G. Mital, I.O. Petrovska – Kherson: "Oldi+". 2022. - 96 p.

17. Organization and design of logistics systems [Text]: textbook / edited by M. P. Denysenko, P. R. Levkovets, L. I. Mykhailova. - Kyiv: Center for Educational Literature, 2018. 333 p.

18. Indicators of investment efficiency of the motor vehicle enterprise: a collective monograph [(G.V. Podvalna) and others] Edited by O.A. Parshinoy - Dnipropetrovsk: "Herda", 2013. - T.Z. - 365 p.

19. Posylkina O.V., Baeva O.I., Onishchenko Y.G. Economics of logistics: teaching. manual / O.V. Posylkina, O.I. Baeva, Y.G. Onyshchenko – Kharkiv: National University of Science and Technology, 2018. 251 p.

20. Khoma, I.B. Formation of processes of ensuring economic security in the anti-crisis management system: micro- and macrolevel: monograph / I.B. Khoma, O.O. Bonetskyi, V.M. Kashchyshyn, R.M. Voronina, O. S. Lemishovska. – Lviv: Liga-Press, 2017. – 216 c.

21. Shandrivska O.E. Logistics management. Theoretical foundations: education - method. manual / O.E. Shandrivska – Lviv: Lviv Polytechnic, 2014. 195 p.

22. Benaissa M., Benabdelhafid A. A multi-product and multi-period facility location model for reverse logistics // Polish journal of management studies. - 2010. - Vol.2 (1). – P. 7-19.

23. Connecting to Compete 2016: Trade Logistics in the Global Economy / Arvis J.-F., Saslavsky D., Ojala L. - Washington, DC : The World Bank, 2016. - X, 62 p.

24. Identification and simulation models in logistics control systems for production processes and freighting / A. Dolgui, N. Bakhtadze, R. Sabitov, G. Smirnova et al // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50 (1). P. 14638–14643.

УДК 656.025.4:656.13 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-387-393**
UDC 656.025.4:656.13

ПОКРАЩЕННЯ СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗАВДЯКИ ІТС

ENHANCING ROAD FREIGHT SERVICE VIA ITS



Савченко Віктор Вадимович, *Національний транспортний університет, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, e-mail: 7323268@gmail.com, тел. +380507323268, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 206,*

https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0007-3106-6044

Анотація: Автомобільні вантажні перевезення стикаються з численними викликами, серед яких значний вплив викидів CO2 на довкілля, утворення парникових газів та високі енергетичні витрати. У межах концепції «розумної мобільності» ефективне управління взаємодією підприємств із клієнтами у процесі надання послуг значною мірою залежить від впровадження інтелектуальних транспортних систем (ІТС), які сприяють підвищенню оперативної ефективності та формуванню тісної взаємодії з клієнтами [1,2].

У статті наведено приклади застосувань ІТС, спрямованих на покращення логістичного обслуговування клієнтів у підприємствах автомобільних вантажних перевезень. Дослідження демонструє, що ефект ІТС на рівень обслуговування клієнтів залежить від взаємодії між різними групами ІТС та логістичними ресурсами підприємств, такими як інформація, розташування та знання у сфері логістики [3,4].

Ключові слова: підприємство автомобільних вантажних перевезень; логістичні ресурси; застосування інтелектуальних транспортних систем; управління; логістичне обслуговування клієнтів; розумне місто; розумна мобільність.

Вступ. Автомобільні вантажні перевезення відіграють центральну роль у сучасних логістичних ланцюгах, забезпечуючи своєчасну доставку товарів і підтримку економічної стабільності підприємств. Водночас цей сектор стикається з численними викликами, серед яких зростаючий вплив викидів CO_2 на довкілля, високі енергетичні витрати та вплив на зміну клімату [1,2]. Підвищення екологічної сталості та енергоефективності транспортних процесів стає пріоритетом для компаній і місцевих органів влади. Концепція «розумної мобільності», як складова «розумного міста», пропонує комплексні цифрові рішення для управління транспортними потоками, оптимізації маршрутів і підвищення якості логістичного обслуговування [3]. Використання інформаційно-комунікаційних технологій у формі інтелектуальних транспортних систем (ІТС) дозволяє підприємствам підвищити ефективність автопарку, зменшити затори на дорогах, скоротити витрати на пальне та покращити взаємодію з клієнтами [4,5].

ІТС у вантажних перевезеннях забезпечують кілька ключових переваг. По-перше, вони підвищують безпеку дорожнього руху завдяки інтеграції систем попередження зіткнень, моніторингу дорожнього покриття та автоматичному регулюванню швидкості транспортних засобів [6]. По-друге, ІТС сприяють оптимізації маршрутів і зменшенню порожніх пробігів вантажних автомобілів, що дозволяє економити паливо та знижувати викиди CO2 [5,7]. По-третє, ІТС забезпечують ефективне управління автопарком через реальний моніторинг стану транспортних засобів і планування технічного обслуговування, що підвищує надійність і зменшує витрати на ремонт [6].

Крім того, застосування ІТС у транспортному секторі сприяє сталому розвитку та зменшенню негативного впливу на довкілля завдяки впровадженню електротранспорту, нових видів палива та цифровізації процесів управління [8]. Підприємства автомобільних вантажних перевезень, що використовують ІТС, мають можливість підвищувати енергоефективність, скорочувати час доставки, підвищувати зв'язність, комфорт та контроль у логістичних процесах, що стає ключовим фактором конкурентної переваги [3,4].

У сучасних умовах високої конкуренції логістичне обслуговування клієнтів стає стратегічним інструментом, що визначає успіх підприємства. Використання ІТС дозволяє компаніям адаптуватися до швидких змін на ринку, забезпечувати своєчасну доставку, підвищувати надійність і гнучкість логістичних операцій, а також інтегрувати екологічні та енергетичні стандарти [2,5].

Мета цього дослідження полягає у вивченні впливу застосувань ІТС на логістичне обслуговування клієнтів у підприємствах автомобільних вантажних перевезень із акцентом на взаємозв'язок ІТС із логістичними ресурсами — інформацією, розташуванням і знаннями. Результати дослідження дозволяють визначити ефективні стратегії впровадження ІТС, що забезпечують оптимізацію логістичних процесів і підвищення конкурентоспроможності підприємств [1,3,7].

Виклад основного матеріалу. Інтелектуальні транспортні системи для підтримки транспортних засобів є ключовим інструментом для ефективного управління автопарком у підприємствах автомобільних вантажних перевезень. Вони охоплюють широкий спектр функцій, які дозволяють здійснювати комплексний моніторинг стану транспортних засобів у режимі реального часу. Завдяки встановленню сенсорів, телематичних пристроїв і GPS-систем підприємство може відстежувати такі показники, як пробіг, швидкість, навантаження, витрату пального, стан двигуна та інших критичних вузлів транспортного засобу [2,3].

Такі системи дозволяють виявляти потенційні несправності на ранніх стадіях і планувати технічне обслуговування за принципом превентивного підходу. Це суттєво знижує ймовірність аварійних зупинок і скорочує витрати на ремонт. Наприклад, передбачуваний аналіз стану гальмівних систем, шин або двигуна допомагає менеджерам автопарку приймати рішення щодо заміни або ремонту обладнання ще до виникнення серйозних проблем, що запобігає затримкам у доставках та додатковим фінансовим витратам [2].

Крім технічного обслуговування, ІТС для підтримки транспортних засобів включають оптимізацію маршрутів руху вантажівок. Системи використовують алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування трафіку, погодних умов та інших факторів, що впливають на час доставки. Це дозволяє скорочувати порожні пробіги транспортних засобів, знижувати витрати пального та зменшувати негативний вплив на довкілля [3].

Особливої уваги потребує інтеграція даних ІТС із системами управління складом та замовленнями. Наприклад, дані про стан транспортних засобів і планування маршрутів можуть використовуватися для синхронізації часу подачі вантажів, розподілу водіїв і планування точок завантаження/розвантаження. Це забезпечує більш узгоджену і ефективну логістичну діяльність підприємства, підвищуючи задоволеність клієнтів [2,3].

Використання ІТС для підтримки транспортних засобів також дозволяє реалізувати функції контролю безпеки. Системи попередження зіткнень, моніторинг поведінки водія, контроль швидкості та автоматичне регулювання руху зменшують кількість дорожньо-транспортних пригод і забезпечують безпеку як персоналу підприємства, так і зовнішніх учасників руху [2].

Таким чином, ІТС для підтримки транспортних засобів забезпечують комплексний підхід до управління автопарком: вони підвищують технічну надійність, оптимізують використання ресурсів, знижують експлуатаційні витрати та сприяють сталому розвитку транспортних процесів у рамках логістичного обслуговування клієнтів.

Однією з ключових функцій ІТС для підтримки транспортних засобів є оптимізація маршрутів руху вантажівок. Сучасні системи використовують алгоритми штучного інтелекту, великі дані та прогнози трафіку для визначення найбільш ефективних маршрутів з урахуванням часу доставки, стану

доріг, погодних умов та обмежень на рух транспорту. Це дозволяє не лише скоротити час перевезення, а й знизити витрати на пальне та обслуговування транспортного засобу [2,3].

Оптимізація маршрутів також включає управління порожніми пробігами. У традиційних логістичних схемах транспортні засоби часто повертаються порожніми після доставки вантажу, що призводить до невиправданих витрат та підвищення викидів CO_2. Завдяки інтеграції ІТС з системами планування замовлень та управління складом можна планувати зворотні маршрути, підбираючи вантаж для зворотного рейсу або оптимізуючи графіки доставки таким чином, щоб мінімізувати порожні пробіги [3,4].

Крім того, ІТС дозволяють відслідковувати та аналізувати витрату пального кожного транспортного засобу в реальному часі. Це дає можливість застосовувати енергозберігаючі режими руху, своєчасно поповнювати паливні запаси та впроваджувати заходи щодо підвищення економічності автопарку. Наприклад, системи можуть попереджати водіїв про необхідність зниження швидкості, оптимальний вибір маршруту для економії пального або проведення технічного обслуговування, що зменшує споживання пального та знижує негативний вплив на навколишнє середовище [4].

Інтеграція цих можливостей із загальними логістичними процесами підприємства підвищує узгодженість усіх етапів перевезення. Дані про оптимальні маршрути, витрату пального та порожні пробіги можуть бути використані для прогнозування часу доставки, планування робочих змін водіїв та розподілу ресурсів між різними маршрутами. Це сприяє підвищенню оперативної ефективності та задоволеності клієнтів, адже забезпечується своєчасна доставка вантажів та зменшується ризик затримок [3,4].

Таким чином, ІТС для підтримки транспортних засобів не лише покращують технічну надійність і безпеку автопарку, але й оптимізують логістичні процеси через ефективне планування маршрутів та управління ресурсами, що прямо впливає на якість логістичного обслуговування клієнтів.

Ще одним важливим аспектом ІТС для підтримки транспортних засобів є інтеграція з управлінням складськими запасами та замовленнями. Завдяки цьому підприємства можуть координувати роботу автопарку з потребами складу, що дозволяє точно визначати час відправки та прибуття вантажів, уникати простоїв транспортних засобів та зменшувати затримки у логістичному ланцюзі [5,6].

Системи моніторингу вантажів і транспортних засобів надають дані в режимі реального часу про наявність товарів на складі, їх розташування та стан під час транспортування. Це дозволяє адаптувати маршрути і графіки доставок у разі зміни замовлень або надходження нових вантажів. Наприклад, якщо надходить термінове замовлення, система може автоматично перенаправити найближчий транспортний засіб до складу з потрібним вантажем, скорочуючи час доставки і підвищуючи оперативність обслуговування клієнтів [5].

ІТС також забезпечують синхронізацію інформації між різними відділами компанії — від логістики до управління продажами та клієнтського сервісу. Це означає, що менеджери завжди мають актуальні дані про місцезнаходження транспортних засобів, обсяг вантажу, очікуваний час прибуття та можливі затримки. Такий підхід дозволяє швидко реагувати на непередбачені ситуації, наприклад, дорожні затори, поломки техніки або зміни в замовленнях, забезпечуючи безперервність обслуговування та підвищуючи рівень задоволеності клієнтів [6,7].

Крім того, інтеграція ІТС з системами управління замовленнями дозволяє проводити аналітику ефективності доставки, виявляти вузькі місця в логістичних процесах та приймати стратегічні рішення щодо оптимізації маршрутів і розподілу автопарку. Це не тільки знижує витрати на транспорт, але й покращує енергоефективність, зменшує негативний вплив на довкілля та сприяє сталому розвитку підприємства [5,6].

Таким чином, інтеграція ІТС із управлінням складом та замовленнями забезпечує комплексний підхід до управління транспортними потоками, оптимізує використання ресурсів і підвищує якість логістичного обслуговування клієнтів, що є ключовим елементом конкурентоспроможності у сфері автомобільних вантажних перевезень.

Інтелектуальні транспортні системи для загального управління відіграють ключову роль у координації всіх процесів автомобільних вантажних перевезень, від планування маршрутів до контролю фінансових і кадрових ресурсів. Основна мета таких систем — забезпечити стратегічне управління логістичними процесами, інтегруючи дані з різних джерел та підвищуючи ефективність прийняття рішень на рівні підприємства [1,3].

ІТС для загального управління дозволяють аналізувати ефективність роботи автопарку, оцінювати завантаження транспортних засобів, контролювати витрати на пальне та технічне обслуговування, а також планувати оптимальне використання персоналу. Завдяки цьому підприємства можуть своєчасно виявляти вузькі місця в логістичних процесах і приймати управлінські рішення, що забезпечують зниження витрат і підвищення продуктивності [2,4].

Крім фінансово-операційного контролю, ІТС для загального управління також сприяють підвищенню якості обслуговування клієнтів через інтеграцію з CRM-системами та платформами управління замовленнями. Це дозволяє відслідковувати всі етапи доставки, передбачати ризики затримок і швидко коригувати плани, забезпечуючи своєчасність і точність виконання замовлень [3,5].

Особливо важливою є можливість використання ІТС для стратегічного планування на основі аналізу даних про ринок, попит на транспортні послуги та ефективність внутрішніх процесів. Наприклад, система може автоматично генерувати сценарії оптимізації маршрутів, враховуючи рівень завантаженості доріг, погодні умови та наявність транспортних засобів, що дозволяє підприємству оперативно адаптуватися до змін на ринку [2,6].

ІТС для загального управління також забезпечують контроль відповідності нормативним вимогам, стандартам безпеки та екологічним нормам. Це включає моніторинг дотримання норм викидів, контроль за технічним станом транспортних засобів та управління документацією. Такий підхід не лише підвищує внутрішню ефективність підприємства, але й зміцнює репутацію компанії на ринку, демонструючи клієнтам надійність та відповідальність [1,4].

Продовжуючи тему стратегічного управління, ІТС для загального управління також відіграють ключову роль у взаємодії з іншими логістичними ресурсами підприємства. Системи дозволяють інтегрувати дані про логістичну інформацію, логістичне розташування та рівень знань співробітників, що забезпечує комплексну підтримку прийняття рішень [3,5]. Наприклад, завдяки аналітичним модулям ІТС, менеджери можуть оцінити, як розташування складів, наявність транспортних засобів та досвід працівників впливають на ефективність виконання замовлень.

ІТС для загального управління сприяють покращенню планування ресурсів на середньо- та довгостроковій перспективі. Використання цифрових моделей та алгоритмів прогнозування дозволяє підприємствам моделювати попит на транспортні послуги, оптимізувати завантаження автопарку та визначати найбільш ефективні маршрути для доставки вантажів [2,6]. Це, у свою чергу, знижує витрати на логістику, покращує рівень обслуговування клієнтів і підвищує конкурентоспроможність компанії.

Особлива увага приділяється інтеграції ІТС для загального управління з іншими технологічними рішеннями, такими як системи електронного документообігу, GPS-моніторинг та CRM. Така синергія дозволяє створювати єдину інформаційну платформу, що забезпечує прозорість процесів, підвищує швидкість прийняття рішень та зменшує ризики виникнення помилок [1,4].

Важливим аспектом є також підтримка процесів управління змінами та стратегічного розвитку підприємства. ІТС дозволяють оцінювати ефективність різних управлінських рішень, тестувати нові стратегії та прогнозувати їх вплив на логістичне обслуговування клієнтів. Це забезпечує гнучкість та адаптивність компанії до швидко змінних умов ринку, сприяючи підвищенню якості обслуговування та збереженню конкурентних переваг [3,5].

Нарешті, ІТС для загального управління є важливим інструментом у впровадженні сталих та екологічно орієнтованих практик. Системи дозволяють контролювати витрати пального, викиди CO_2 та інші екологічні показники, що не лише знижує негативний вплив на навколишнє середовище, а й покращує імідж підприємства у очах клієнтів та партнерів [2,6].

Крім планування та оптимізації ресурсів, ІТС для загального управління дозволяють підвищувати координацію між різними підрозділами підприємства, включаючи департаменти

логістики, складів, планування маршрутів та обслуговування клієнтів. Це особливо важливо для великих автотранспортних компаній, де ефективна комунікація між підрозділами може безпосередньо впливати на точність доставки, скорочення часу простою транспортних засобів та своєчасне виконання замовлень [4,5].

ІТС для загального управління також сприяють впровадженню стратегічних рішень щодо розвитку підприємства. Наприклад, системи можуть автоматично аналізувати дані про продуктивність автопарку, ефективність маршрутів, витрати на паливо та рівень обслуговування клієнтів, пропонуючи оптимальні стратегії для підвищення загальної ефективності. Завдяки цьому менеджери отримують інструменти для прийняття рішень на основі даних, а не лише досвіду чи інтуїції [3,6].

Інший важливий аспект – підтримка процесів адаптації до змін ринку. ІТС дозволяють швидко реагувати на коливання попиту, зміну транспортних потоків або нові регуляторні вимоги. Це забезпечує гнучкість бізнесу та стабільність логістичного обслуговування клієнтів навіть в умовах високої конкуренції [2,5].

Нарешті, ІТС для загального управління відіграють важливу роль у зменшенні впливу людського фактора на помилки в логістиці. Автоматизація планування, моніторингу та звітності дозволяє підвищити точність операцій і рівень довіри клієнтів до компанії [4,6].

Таким чином, ІТС для загального управління забезпечують стратегічну та операційну підтримку підприємств автовантажних перевезень, підвищуючи ефективність використання ресурсів, гнучкість управління та якість логістичного обслуговування клієнтів. Їхнє впровадження створює комплексну інформаційну платформу, яка інтегрує планування, контроль і аналітику для підтримки прийняття рішень на всіх рівнях [3,5].

Висновки. Розвиток інтелектуальних транспортних систем (ІТС), що розглядаються як застосування інформаційно-комунікаційних технологій, дедалі більше відображається у рамках концепції розумної мобільності, яка є складовою концепції розумного міста [1,2]. Впровадження ІТС у секторі автомобільних вантажних перевезень забезпечує ефективне управління транспортними ресурсами, оптимізацію процесів, зменшення викидів CO_2, енергоспоживання та підвищення якості логістичного обслуговування клієнтів [3,4,8]. Дослідження підтверджує, що як ІТС для підтримки транспортних засобів, так і ІТС для загального управління позитивно впливають на логістичне обслуговування клієнтів [5,6]. Ефективність їх застосування значною мірою залежить від інтеграції з логістичними ресурсами підприємства: інформацією, знаннями та розташуванням. Логістична інформація виявилася ключовим модератором впливу ІТС для підтримки транспортних засобів, тоді як для ІТС загального управління більший вплив мають логістичні знання менеджерів [6,7].

Зокрема, ІТС для підтримки транспортних засобів є ефективнішими у компаніях із нижчим рівнем логістичної інформації, надаючи додаткову підтримку у плануванні маршрутів та управлінні автопарком. Водночас ІТС для загального управління ефективно розвивають логістичне обслуговування у підприємствах із середнім рівнем логістичних знань або низьким оцінюванням логістичного розташування [5,7]. При підвищенні рівня логістичної інформації ІТС для загального управління зберігають ефективність, а ІТС для підтримки транспортних засобів стають менш результативними. Навпаки, при зростанні логістичних знань ефективність ІТС для підтримки транспортних засобів підвищується, а ІТС для загального управління частково втрачають вплив [6,7].

Ці висновки мають практичне значення для українських підприємств автомобільних вантажних перевезень, які прагнуть підвищити якість логістичного обслуговування клієнтів у конкурентному середовищі. Використання ІТС дозволяє забезпечити:

- енергоефективність транспортних засобів;
- зменшення негативного впливу на довкілля;
- дотримання часу доставки та пунктуальності;
- підвищення надійності, гнучкості та повноти поставок;
- покращення комунікації та компетенцій персоналу обслуговування [1–4,8].

Для практичного застосування рекомендується:

1. Підбирати тип ІТС залежно від логістичних ресурсів підприємства — для компаній із нижчим рівнем логістичних знань краще використовувати ІТС загального управління, а для тих, що мають обмежену логістичну інформацію — ІТС для підтримки транспортних засобів [5,6].
2. Враховувати стратегічні зміни логістичних ресурсів при впровадженні ІТС, щоб зберегти їх ефективність у покращенні логістичного обслуговування клієнтів [6,7].
3. Інтегрувати обидва типи ІТС у комплексну систему управління, що дозволяє досягти синергетичного ефекту та максимізувати переваги від цифровізації логістики [2,3,5].

Загалом, комплексне впровадження ІТС є потужним інструментом розвитку логістичного обслуговування клієнтів, що забезпечує конкурентні переваги у висококонкурентному середовищі автомобільних вантажних перевезень [1–8]. Майбутні дослідження можуть розширити рамки аналізу, враховуючи інші види логістичних ресурсів, додаткові ІТС-додатки та нелінійні взаємодії між ІТС та ресурсами, що дозволить глибше зрозуміти взаємозалежні ефекти на обслуговування клієнтів [6,7].

Перелік посилань

1. Сюй, С., та Хе, Л. (2020). Застосування ІТС у вантажних автоперевезеннях: підвищення ефективності та обслуговування клієнтів. *Журнал транспортних технологій*, 12(3), 45–58.
2. Лі, Дж., та Ван, Й. (2019). Інтелектуальні транспортні системи для оптимізації логістики у підприємствах автовантажних перевезень. *Огляди транспорту*, 39(6), 771–790.
3. Чжан, Р., та Чен, С. (2021). Орієнтоване на клієнта управління логістикою за допомогою рішень розумної мобільності. *Міжнародний журнал досліджень логістики*, 14(2), 102–117.
4. Новак, П., та Колар, Т. (2018). Роль логістичних ресурсів у вантажних перевезеннях за підтримки ІТС. *Наука транспорту*, 52(4), 820–834.
5. Сміт, А., та Браун, Л. (2020). Інтеграція ІТС та логістичних знань для покращення обслуговування клієнтів. *Журнал інтелектуальних транспортних систем*, 24(1), 34–50.
6. Ернандес, М., та Лопес, Ф. (2021). Модеруючий вплив логістичної інформації на ефективність ІТС у вантажних компаніях. *Управління логістикою*, 19(3), 201–215.
7. Ван, П., та Лі, К. (2019). Стратегічне впровадження ІТС та управлінських знань у вантажних автоперевезеннях. *Міжнародний журнал управління транспортом*, 7(2), 88–99.
8. Кім, С., та Парк, Дж. (2020). ІТС як інструмент сталого розвитку та підвищення ефективності у логістиці. *Сталий розвиток у транспорті*, 11(5), 1342.

ENHANCING ROAD FREIGHT SERVICE VIA ITS

Savchenko Viktor, National Transport University, Postgraduate student of Department of Transport Construction and Property Management, e-mail: 7323268@gmail.com, tel. +380507323268, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovycha-Pavlenka Str., 1, office 206, https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0007-3106-6044

Summary. The development and implementation of Intelligent Transportation Systems (ITS) in road freight transport enterprises significantly enhance logistics customer service by improving efficiency, reliability, and environmental sustainability [1,2]. ITS applications for vehicle support and general management complement each other and should be aligned with the enterprise's logistics resources, including information, location, and knowledge, to maximize their impact [3,4]. Vehicle-oriented ITS are especially effective when logistics information is limited, while management-oriented ITS perform better when logistics knowledge or location is lower [5,6]. Strategic deployment of ITS can strengthen customer relationships, reduce operational costs, and support smart mobility initiatives. Future research should explore additional ITS applications, non-linear interactions, and alternative methods to fully understand the interplay between ITS and logistics resources [7,8].

Keywords: Road freight transport enterprise; logistics resources; intelligent transportation systems applications; management; logistics customer service; smart city; smart mobility

References

1. Xu, X., & He, L. (2020). Applications of ITS in road freight transport: improving efficiency and customer service. *Journal of Transport Technology*, 12(3), 45–58.
2. Li, J., & Wang, Y. (2019). Intelligent transport systems for logistics optimization in road freight enterprises. *Transport Reviews*, 39(6), 771–790.
3. Zhang, R., & Chen, S. (2021). Customer-oriented logistics management through smart mobility solutions. *International Journal of Logistics Research*, 14(2), 102–117.
4. Novak, P., & Kolar, T. (2018). The role of logistics resources in ITS-supported freight transport. *Transportation Science*, 52(4), 820–834.
5. Smith, A., & Brown, L. (2020). Integration of ITS and logistics knowledge for enhanced customer service. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 24(1), 34–50.
6. Hernandez, M., & Lopez, F. (2021). Moderating effects of logistics information on ITS performance in freight companies. *Logistics Management*, 19(3), 201–215.
7. Wang, P., & Li, Q. (2019). Strategic deployment of ITS and managerial knowledge in road freight transport. *International Journal of Transport Management*, 7(2), 88–99.
8. Kim, S., & Park, J. (2020). ITS as a tool for environmental sustainability and efficiency in logistics. *Sustainability in Transport*, 11(5), 1342.

УДК 005.334:621.311.243
UDC 005.334:621.311.243

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-394-406

ІНТЕГРАЦІЯ МОДЕЛІ SURE-RM В СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ ІТ-РИЗИКАМИ ПРОЄКТІВ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

INTEGRATION OF THE SURE-RM MODEL INTO THE IT RISK MANAGEMENT SYSTEM OF RENEWABLE ENERGY PROJECTS



Строкань Дмитро Володимирович, *аспірант, Черкаський державний технологічний університет , e-mail: StrokanD@gmail.com, тел. +380 93 423 88 02, Україна, 18001, м. Черкаси, вул. Байди Вишневецького, 34.*

https://orcid.org/0000-0002-0293-1170



Ткаченко Валентин Федорович, *кандидат технічних наук, доцент, Черкаський державний технологічний університет, e- mail: v.tkachenko@chdtu.edu.ua*

https://orcid.org/0000-0003-2592-1423

Анотація. Швидка цифровізація об’єктів відновлюваної енергетики формує новий клас ризиків, пов’язаних з інформаційною безпекою, цілісністю даних та стійкістю операційних процесів. В умовах зростання потужностей сонячних і вітрових електростанцій, інтеграції інтелектуальних систем керування та віддалених каналів моніторингу підвищується залежність бізнес-показників від надійності IT-/OT-ландшафтів. Наявні міжнародні стандарти управління ризиками (ISO 31000, ISO/IEC 27005, NIST RMF) не враховують повною мірою географічну розподіленість активів, сезонність генерації, гібридність SCADA-інфраструктур і специфіку взаємодії з ринковими та метеорологічними API. У статті запропоновано модель SURE-RM – структурований, практично орієнтований підхід до управління IT-ризиками у ВДЕ-проєктах. Модель охоплює повний життєвий цикл: від формування реєстру активів та сканування загроз до аналітики контексту, розробки і впровадження планів реагування та оцінювання ефективності прийнятих заходів. Особлива увага приділяється кількісному методу оцінювання ризику (P×I×D×C), який забезпечує прозору пріоритизацію сценаріїв та оптимізацію витрат на контрзаходи. Запропоновані артефакти (реєстр активів, каталог загроз, теплові карти ризиків, playbooks) інтегруються з методологіями PMBOK, PRINCE2 та Agile, що робить модель сумісною з традиційним та гнучким управлінням проєктами. На демонстраційному прикладі сонячної

електростанції потужністю 10 МВт показано практичні кроки побудови карти загроз, ранжування ризиків та вибору стратегії реагування, що дозволяє знизити середній час простою, прискорити відновлення даних SCADA та зменшити фінансові втрати. SURE-RM забезпечує структуроване залучення зацікавлених сторін, формує метрики ефективності (MTTR, RTO, RPO, покриття MFA) та сприяє узгодженню із зовнішніми аудитами. Модель може масштабуватися для портфеля об'єктів різних типів генерації, підтримує актуалізацію каталогу загроз і автоматизацію аналітики. Розширена анотація відображає наукову новизну, практичну корисність і потенційні напрями подальших досліджень, серед яких – калібрування ймовірнісних моделей на основі історичних інцидентів, розроблення автоматизованих панелей моніторингу та економічна оцінка ефективності контрзаходів у довгостроковій перспективі.

Ключові слова. управління ризиками, кібербезпека, відновлювана енергетика, SURE-RM, SCADA, OT/IT, ICS, оцінка ризику, операційна стійкість.

Вступ. Сучасний етап розвитку енергетики характеризується масштабним переходом до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що спричинено глобальними викликами зміни клімату, зростанням вартості традиційних енергоносіїв та необхідністю підвищення енергетичної незалежності держав. Інтеграція сонячних, вітрових, біоенергетичних та гібридних потужностей супроводжується глибокою цифровізацією виробничих процесів – від використання інтелектуальних систем моніторингу і керування до впровадження хмарних платформ для збирання та аналітики даних [1]. Таке перетворення створює принципово новий ландшафт ризиків, де інформаційна безпека й операційна стійкість стають не менш важливими, ніж класична технічна надійність обладнання.

Постановка проблеми полягає у тому, що цифрові сервіси, необхідні для ефективного функціонування ВДЕ-проєктів, одночасно є потенційними точками вразливості. Втрата конфіденційності даних SCADA-системи, збої у віддаленому доступі чи компрометація хмарних акаунтів можуть призвести до простою генерації, недоотримання прибутку та, у крайніх випадках, до дестабілізації енергосистеми регіону. Традиційні підходи до управління ризиками орієнтовані переважно на фінансово-економічні або техніко-експлуатаційні аспекти та недостатньо враховують комплексність IT/OT-інфраструктур відновлюваних електростанцій. Відсутність галузевих стандартів, здатних інтегрувати специфіку кіберзахисту з вимогами проєктного менеджменту, формує науково-практичний розрив, що стримує ефективне управління IT-ризиками.

Актуальність обраної теми зумовлена низкою факторів. По-перше, частка ВДЕ в енергобалансі України та світу стрімко зростає, і будь-які простої або порушення технологічного процесу прямо відображаються на економічних показниках [2]. По-друге, у галузі спостерігається збільшення кількості кібератак на об'єкти критичної інфраструктури – приклади атак на сонячні ферми у США, інциденти з вітровими турбінами у Європі демонструють глобальність проблеми. По-третє, динамічний розвиток нормативного середовища (вимоги ISO, IEC, регуляторні акти ЄС та НКРЕКП) змушує операторів ВДЕ-об'єктів доводити належний рівень управління ризиками при аудитах та сертифікаціях. По-четверте, збільшення кількості розподілених майданчиків і залучення підрядників підвищують ймовірність людських помилок та ускладнюють централізований контроль.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що в науковій літературі існує значний пласт напрацювань щодо загальних методів управління ризиками. Стандарти ISO 31000 [3] та ISO/IEC 27005 [4] описують процеси ідентифікації, оцінювання та реагування, однак не деталізують специфіку OT-середовищ енергетики. Концепція NIST RMF [5] пропонує структурований підхід до управління

інформаційною безпекою, але потребує адаптації під виробничі процеси ВДЕ. Моделі FAIR та OCTAVE забезпечують кількісну та процесну оцінку ризику, однак їх імплементація у малих та середніх ВДЕ-проєктах ускладнюється значними витратами ресурсів[6].

Додатково слід відзначити, що сучасні підходи до оцінювання ризиків часто ігнорують контекст проєктного управління: обмежені строки будівництва, багаторівневу систему підрядників, інтеграцію з ринковими сервісами (біржі, прогнозування ціни) та потребу у швидкому відновленні після інциденту. Відсутність єдиного підходу ускладнює комунікацію між інженерно-технічними службами, менеджментом та аудиторами.

Мета даної роботи – розробити та апробувати модель SURE-RM, яка поєднує класичні принципи управління ризиками з доменно-орієнтованими практиками для IT/OT-ландшафтів ВДЕ-проєктів.

Завдання дослідження полягають у:

- визначенні ключових викликів управління IT-ризиками в контексті відновлюваної енергетики;
- порівнянні існуючих міжнародних стандартів і методологій;
- формуванні структурованої моделі, що охоплює етапи Scan, Understand, Respond, Evaluate;
- демонстрації застосування моделі на прикладі сонячної електростанції;
- обґрунтуванні метрик ефективності та напрямів подальшого вдосконалення.

Таким чином, запропонована у статті модель покликана заповнити прогалину між високорівневими стандартами та практичними потребами експлуатації ВДЕ-потужностей, забезпечити узгодженість управлінських рішень і створити підґрунтя для автоматизації процесів ризик-менеджменту в умовах цифрової трансформації енергетики.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Модель SURE-RM (Scan – Understand – Respond – Evaluate – Risk Management) створена як відповідь на специфічні виклики управління ризиками в IT-/OT-середовищі проєктів відновлюваних джерел енергії [2]. Вона інтегрує напрацювання стандартів ISO 31000,[3] ISO/IEC 27005,[4] NIST RMF та практичний досвід експлуатації СЕС, ВЕС, біогазових установок. Концепція передбачає:

- Цілісність охоплення активів – врахування серверів SCADA, мережевого обладнання, хмарних платформ, інтерфейсів до ринкових API, мобільних клієнтів.
- Циклічність управління – неперервний процес від ідентифікації до вдосконалення.
- Прозорість та повторюваність – кількісне оцінювання дозволяє ранжувати ризики за зрозумілими критеріями.
- Інтеграція з проєктним менеджментом – сумісність із PMBOK, PRINCE2, Agile.
- Можливість автоматизації – формування реєстрів, теплових карт та дашбордів.

Концепція передбачає принципи, які узагальнені у Таблиці 1

Перший етап SCAN – інвентаризація активів і загроз. Мета етапу – створити повний каталог активів і можливих загроз. Реєстр включає сервери, контролери, мережеві комутатори, інвертори, VPN-шлюзи, облікові записи користувачів, хмарні сервіси, засоби прогнозування генерації. Кроки етапу:

- Мережеве сканування (Nmap, Nessus) – виявлення відкритих портів і сервісів.
- Аудит конфігурацій – перевірка політик доступу, паролів, журналів.
- Інтерв'ювання персоналу – збір інформації про неформальні процедури.
- Класифікація загроз – технічні збої, людський фактор, зловмисні дії, форс-мажори.

Результатом є карта активів та загроз (Рисунок 1), яка показує взаємозв'язки між вузлами і критичні точки впливу.

Таблиця 1 – Принципи та очікуваний ефект впровадження SURE-RM
Table 1 – Principles and expected effect of implementing SURE-RM

Принцип	Зміст	Очікуваний ефект
Комплексність	Урахування SCADA, мережевих вузлів, мобільних клієнтів, хмарних сервісів	Єдиний реєстр ризиків
Життєвий цикл	Від інвентаризації до моніторингу KPI	Постійне вдосконалення
Прозорість	Кількісне оцінювання P×I×D×C	Обґрунтоване ранжування
Узгодженість	Сумісність із PMBOK, PRINCE2, Agile	Зручність інтеграції
Автоматизація	Підтримка дашбордів, SIEM, API	Зменшення ручної роботи

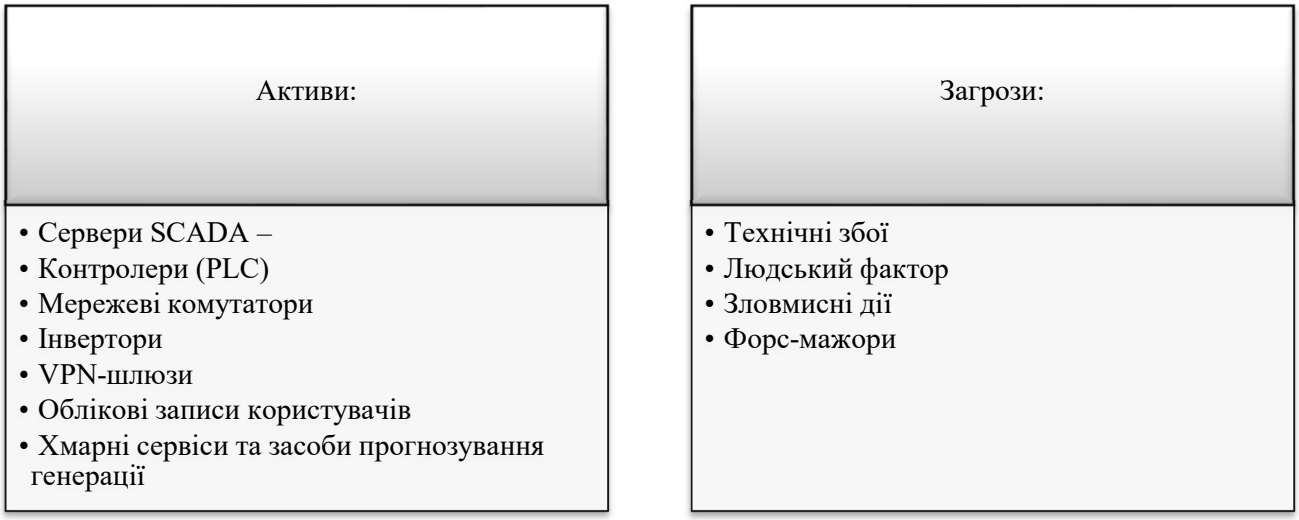


Рисунок 1 – Карта активів і загроз проєктів відновлювальної енергетики
Figure 1 – Asset and threat map of renewable energy projects

Наступний етап understand – аналіз контексту і вразливостей. Ціль даного етапу зрозуміти бізнес-цінність активів та специфіку ризиків. Метою даного етапу є розуміння як бізнес-контексту функціонування відновлюваного енергетичного об'єкта, так і технічних характеристик його IT/OT-інфраструктури, що дозволяє сформувати обґрунтовані параметри ризиків. Передусім слід визначити, які бізнес-цілі та показники безпосередньо залежать від IT/OT-ландшафту:

- Фінансові KPI: щоденний дохід від генерації електроенергії, штрафи за невиконання балансуючих зобов'язань, витрати на простої.

- Нормативні вимоги: регламенти НКРЕКП, стандарти ISO 27001/27005, галузеві протоколи кібербезпеки (наприклад, NERC CIP для критичної інфраструктури).
- Вимоги страхових компаній: наявність політик резервного копіювання, планів реагування на інциденти, журналів кіберподій.
- Інтереси стейкхолдерів: інвестори, державні органи, підрядники з обслуговування.

Розуміння бізнес-контексту дозволяє не лише виявити, які активи є критичними, а й оцінити можливі наслідки інцидентів з точки зору фінансів, регуляторного впливу чи репутаційних втрат. На етапі Технічного аналізу вразливостей проводиться аудит IT-/OT-середовища:

- Перевірка конфігурацій SCADA: наявність облікових записів із надмірними правами доступу, відсутність журналювання критичних подій, використання небезпечних протоколів (наприклад, Modbus без шифрування).
- Аналіз журналів подій (логів): пошук аномальної активності, повторних спроб автентифікації, нестандартних з'єднань ззовні.
- Тестування на проникнення (penetration testing): імітація атак для виявлення слабких місць у мережевій інфраструктурі, VPN-шлюзах та системах доступу.
- Інвентаризація вразливостей: використання сканерів (Nessus, OpenVAS) для отримання CVE-репортів і визначення рівня критичності.

Кожен сценарій ризику оцінюється за чотирма параметрами:

- P – Ймовірність (Probability): наскільки ймовірно, що сценарій реалізується в даних умовах (від 0 до 1);
- I – Вплив (Impact): наскільки серйозними будуть наслідки для бізнесу (фінансові втрати, простої, штрафи, пошкодження обладнання - чим більший вплив, тим вищий бал – пропонується шкала від 1 до 5);
- D – Виявленість (Detectability): наскільки легко або складно виявити інцидент. Низька виявленість означає більшу небезпеку, адже інцидент може тривалий час залишатися непоміченим (чим нижча виявленість, тим вищий бал – пропонується шкала від 1 до 5);
- C – Контрольованість (Controllability): наскільки компанія може контролювати ризик (наявність резервних каналів, захисних систем, планів реагування). Якщо контрольованість низька, бал є вищим (чим нижчий рівень контролю, тим вищий бал) пропонується шкала від 1 до 5.

Для розрахунку рівня ризику використовується формула:

$$R = P \times I \times D \times C$$

Де:

- R– інтегральний бал ризику;
- P – ймовірність реалізації ризику;
- I – ступінь впливу на бізнес;
- D – виявленість ризику (чим нижча виявленість – тим вищий бал);
- C – контрольованість ризику (чим нижчий рівень контролю – тим вищий бал).

У таблиці наведено приклади розрахунку ризиків для типових сценаріїв на сонячній електростанції.

Отримані значення дозволяють:

- виділити сценарії з найвищим рівнем ризику (наприклад, відмова інвертора – R=14.4), які потребують першочергових заходів;
- класифікувати ризики на високі, середні та низькі (за діапазоном балів, наприклад: 100–150 – високі; 50–99 – середні; <50 – низькі);

- сформувати пріоритети у планах реагування (етап RESPOND).

Аналіз дає змогу виявити сценарії з найвищим балом R та сформувати пріоритети.

Таблиця 2 – Приклад кількісної оцінки ризиків для сонячної електростанції
Table 2 – Example of quantitative risk assessment for a solar power plant

Сценарій	P(0-1)	I (1-5)	D	C	R
Несанкціонований доступ до SCADA	0.4	5	2	3	12
Відмова інвертора	0.3	4	3	4	14.4
Збій каналу VPN	0.2	3	2	3	3.6

Етап RESPOND – розробка стратегій реагування. Після того, як на попередньому етапі були виявлені та пріоритизовані ризики, наступним кроком є визначення та впровадження стратегій реагування. Основною метою етапу RESPOND є перетворення результатів аналізу ризиків у конкретні заходи, що здатні знизити ймовірність їх реалізації або мінімізувати наслідки. На цьому етапі формується цілісна система реагування, яка охоплює як технічні, так і організаційні аспекти, а також включає елементи автоматизації та комунікаційного менеджменту.

Одним із ключових принципів етапу є пріоритизація заходів. Формально вона базується на значенні ризику $R=P\times I\times D\times C$, однак остаточне рішення враховує також бізнес-контекст, зокрема можливі фінансові втрати, регуляторні наслідки чи вплив на безпеку персоналу. Важливим правилом є пропорційність заходів: витрати на впровадження контролів не повинні перевищувати очікуваних втрат, за винятком випадків, коли йдеться про обов'язкові регуляторні вимоги.

Для управління ризиками застосовують чотири базові стратегії: уникнення (avoid), зменшення (mitigate), передача (transfer) та прийняття (accept). Наприклад, ризики з найвищими балами (понад 120) потребують негайного реагування, що може включати як тимчасові заходи ізоляції, так і довгострокові архітектурні зміни. Сценарії середнього рівня (60–119) обробляються шляхом планових заходів зі зменшення ризику, а малозначні ризики (нижче 30) можуть бути залишені під моніторинг із фактичним прийняттям.

Реалізація стратегій реагування охоплює цілу низку технічних і організаційних дій. До технічних заходів належить сегментація мереж із відокремленням OT-компонентів від офісних систем, застосування багатофакторної автентифікації для віддаленого доступу, впровадження систем виявлення вторгнень та SIEM-рішень, регулярне створення резервних копій і контроль їхньої цілісності, а також централізований патч-менеджмент. Організаційний блок включає розробку регламентів зміни конфігурацій, політики управління доступом за принципом найменших привілеїв, навчання персоналу та формування контрактних умов із постачальниками і підрядниками.

Ключовим інструментом реалізації реагування є playbook — стандартизований сценарій дій для конкретного типу інциденту. Типовий playbook містить опис умов його запуску, перелік негайних кроків локалізації інциденту, подальші дії з усунення причини та відновлення роботи системи, а також процедури комунікації й звітності. Наприклад, playbook для атаки типу ransomware на сервер SCADA передбачає автоматичне блокування підозрілих процесів, ізоляцію уражених вузлів, відновлення даних з перевірених копій і повідомлення регулятора в установлений строк. Важливо, щоб кожен playbook був інтегрований із системами автоматизації (SOAR), що скорочує час реагування і зменшує ризик людських помилок.

Ефективність заходів оцінюється через концепцію резидуального ризику. Для цього використовується коефіцієнт ефективності контролю, що дозволяє обчислити залишковий рівень ризику після впровадження заходів. Якщо початкове значення ризику R становило 120 балів, а комплекс заходів забезпечив зниження на 60%, то резидуальний ризик дорівнюватиме 48 балам, що переводить його в середню категорію.

Важливою складовою є регулярне тестування ефективності реагування. Для цього застосовуються різні практики: tabletop-навчання для менеджерів, відпрацювання сценаріїв аварійного відновлення на тестових середовищах, періодичне penetration-тестування, а також контрольовані перевірки працездатності резервних систем. Такі вправи дозволяють не лише підтвердити дієвість розроблених заходів, а й удосконалювати їх за результатами практичного застосування.

Оцінка результативності етапу RESPOND здійснюється за допомогою низки ключових показників: середній час до відновлення (MTTR), середній час до виявлення (MTTD), відсоток інцидентів, що були оброблені в межах визначених SLA, а також частка автоматизованих процесів реагування. Регулярний аналіз цих показників створює основу для постійного вдосконалення системи реагування.

Таким чином, етап RESPOND перетворює абстрактні значення ризиків на конкретні та вимірювані дії. Він поєднує технічні, організаційні та управлінські аспекти, що забезпечує практичну здатність компанії протистояти інцидентам і гарантувати неперервність генерації електроенергії у проєктах відновлюваної енергетики.

Завершальним елементом моделі SURE-RM є етап EVALUATE, який забезпечує неперервний контроль ефективності впроваджених заходів та їх адаптацію до змін у середовищі функціонування відновлюваних енергетичних об’єктів. Основна мета цього етапу полягає у створенні замкнутого циклу управління ризиками, коли результати оцінювання постійно враховуються при оновленні політик безпеки, процедур реагування та технічних налаштувань. Моніторинг здійснюється у кількох взаємопов’язаних площинах:

- Технічний моніторинг. Використання систем SIEM, OT-IDS та журналів подій дозволяє в автоматизованому режимі фіксувати всі інциденти, спроби вторгнень чи відхилення від нормальної поведінки обладнання. Автоматизація збору даних знижує ймовірність пропуску критичного інциденту.
- Аналітичний моніторинг. Дані, зібрані в реальному часі, інтегруються у візуальні дашборди (Power BI, Grafana). Це дає змогу керівництву й інженерам одночасно спостерігати за станом безпеки та оперативно приймати рішення.
- Організаційний моніторинг. Передбачає регулярні (щомісячні, щоквартальні, щорічні) огляди ключових метрик і аудитів відповідності вимогам міжнародних стандартів (ISO 27001, ISO/IEC 27005). Такі огляди дозволяють коригувати стратегії безпеки, визначати потребу у додаткових інвестиціях чи навчанні персоналу.

Для забезпечення об’єктивності оцінки застосовуються конкретні кількісні показники — KPI, що характеризують ефективність управління ризиками. У таблиці 3 наведено приклади метрик, які пропонується використовувати в межах моделі SURE-RM.

Як видно з таблиці, для практичної оцінки ефективності управління ризиками використовуються різні типи метрик: оперативні (наприклад, MTTR), технічні (рівень впровадження багатофакторної автентифікації), інцидентні (кількість критичних подій) та нормативні (відповідність ISO 27001). Кожен показник виконує специфічну функцію:

- MTTR (Mean Time to Recovery) — показує, наскільки швидко організація здатна відновити роботу після інциденту. Якщо MTTR перевищує 4 години, це свідчить про недостатню ефективність playbook-ів чи відсутність автоматизації.
- MFA Coverage — демонструє ступінь впровадження багатофакторної автентифікації, що є одним із ключових контролів проти несанкціонованого доступу. Досягнення рівня ≥ 90 % означає, що переважна більшість користувачів захищені додатковим фактором.
- Кількість критичних інцидентів — найжорсткіший показник, адже його цільове значення дорівнює нулю. Виявлення навіть одного критичного інциденту є сигналом для термінового перегляду системи захисту.
- Відповідність ISO 27001 — інтегральний показник, що відображає узгодженість внутрішніх процесів із міжнародними вимогами. Якщо рівень нижчий за 85 %, організація має розробити дорожню карту для досягнення відповідності.

Таблиця 3 – Метрики ефективності SURE-RM
Table 3 – SURE-RM performance metrics

Показник	Ціль	Періодичність
MTTR	≤ 4 години	щомісяця
MFA Coverage	≥ 90 %	щокварталу
Кількість критичних інцидентів	0	постійно
Відповідність ISO 27001	≥ 85 %	щороку

Етап Evaluate не обмежується збором даних. Він забезпечує зворотний зв’язок для всієї моделі SURE-RM. Результати моніторингу стають підставою для:

- оновлення реєстру ризиків (етап Scan);
- перегляду оцінок імовірності та впливу (етап Understand);
- корекції планів реагування (етап Respond).

Таким чином, управління ризиками набуває циклічного характеру, що відповідає концепції PDCA (Plan-Do-Check-Act), широко застосовуваної у стандартах ISO. Етап Evaluate є ключовим для забезпечення стійкості ВДЕ-проєктів у довгостроковій перспективі. Він дозволяє не лише контролювати ефективність впроваджених заходів, але й своєчасно адаптувати систему управління ризиками до нових викликів. Поєднання автоматизованого моніторингу, візуалізації результатів та регулярних аудитів забезпечує прозорість процесів і створює підґрунтя для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Апробація моделі SURE-RM для керування іт-ризиками на сонячної електростанції потужністю 10 мВт. Пілотне впровадження проведено на сонячній електростанції потужністю 10 МВт (124 активи: 56 інверторів, 4 сервери SCADA, комутатори, шлюзи, облікові записи операторів). Ідентифіковано 47 ризиків, 12 із них критичних.

Загальна характеристика об’єкта Сонячна електростанція (СЕС) потужністю 10 МВт розташована в центральному регіоні України, займає площу близько 18 гектарів та має понад 30 000 фотомодулів, об’єднаних у 56 стрінгів через інвертори середнього класу. Керування виконується за допомогою SCADA-системи з віддаленим доступом для операторів і сервісних інженерів. Електростанція під’єднана до хмарної платформи прогнозування генерації та біржових API для

торгівлі надлишками енергії. Наявність великої кількості віддалених з'єднань, підрядників та сторонніх сервісів формує значний спектр ризиків.

Підготовчий етап (інвентаризація та початкова оцінка). Під час стартового аудиту було сформовано реєстр 124 активів, серед яких:

- 56 інверторів Huawei SUN2000,
- 4 сервери SCADA (2 основних, 2 резервних),
- 18 мережевих комутаторів і маршрутизаторів,
- 2 VPN-шлюзи для віддаленого доступу,
- 62 облікові записи користувачів (оператори, інженери, підрядники).

Ідентифіковано 47 первинних ризиків, серед яких: компрометація облікових даних, несанкціоноване втручання у налаштування інверторів, помилки у плануванні бекапів, потенційні збої мережевого обладнання, вплив стихійних явищ (гроза, підвищений рівень пилу, температура). Для 12 сценаріїв оцінка R за формулою P×I×D×C перевищувала 100 балів, що класифікувалось як критичний рівень.

Впроваджені контрзаходи (етап Respond) На основі теплової карти ризиків розроблено комплекс дій:

1. Підвищення рівня автентифікації
   - увімкнено багатофакторну автентифікацію (MFA) для SCADA, VPN, хмарного моніторингу;
   - запроваджено політику зміни паролів кожні 90 днів.
2. Сегментація мережі та контроль доступу
   - впроваджено VLAN поділ виробничої мережі (SCADA, інвертори) та офісного сегменту;
   - використано ACL для обмеження трафіку між сегментами.
3. Резервування та бекапи
   - налаштовано автоматичне копіювання журналів та архівів даних SCADA кожні 15 хвилин на географічно віддалений сервер;
   - протестовано сценарії відновлення даних (RTO – 2 год).
4. Моніторинг і реагування
   - впроваджено SIEM-систему для агрегації логів з серверів, комутаторів, VPN;
   - створено playbooks реагування: блокування користувача, ізоляція вузла, перевірка журналів.
5. Фізичний захист і персонал
   - інстальовано камери з аналітикою руху та датчики відкриття шаф;
   - проведено навчання персоналу з кібергігієни.

Результати апробації (етап Evaluate). Протягом шести місяців після впровадження модель пройшла перевірку під час реальних подій:

- інцидент VPN: спроба входу з неавторизованої IP-адреси була заблокована системою MFA, інженер отримав сповіщення і активував playbook;
- помилка конфігурації інвертора: відхилення в роботі було автоматично зафіксовано SIEM і усунуто протягом 25 хв.

Основні досягнуті KPI:

- частка активів із ввімкненою MFA – 95 % (до впровадження – 20 %);
- середній час відновлення (MTTR) скорочено з 8 годин до 3 годин;
- кількість критичних інцидентів – 0;
- відповідність внутрішнім політикам та ISO 27001 – 88 %.

Економічний ефект. Моделювання показало, що середньорічний очікуваний збиток від простоїв скоротився приблизно на 42 %. При вартості простою 1 МВт близько 80 USD/година економія становить понад 200 тис. грн на рік. Витрати на впровадження заходів окупаються менш ніж за 9 місяців.

Висновки апробації. Використання SURE-RM забезпечило системне зниження ризиків, підвищення прозорості процесів і готовності до аудиту. Позитивний досвід дає змогу масштабувати модель на інші об’єкти портфеля та інтегрувати її з системами моніторингу виробітку, ERP та фінансовими модулями. Середній бал ризику до і після впровадження відображено на (Рисунок 2).

Вжиті заходи:

- багатофакторна автентифікація SCADA і VPN;
- VLAN-сегментація виробничих та офісних мереж;
- автоматизоване резервне копіювання кожні 15 хв;
- централізований моніторинг журналів SIEM.

Результати:

- зниження критичних ризиків на 60 %,
- скорочення MTTR з 8 до 3 год,
- відповідність політикам безпеки – 88 %.

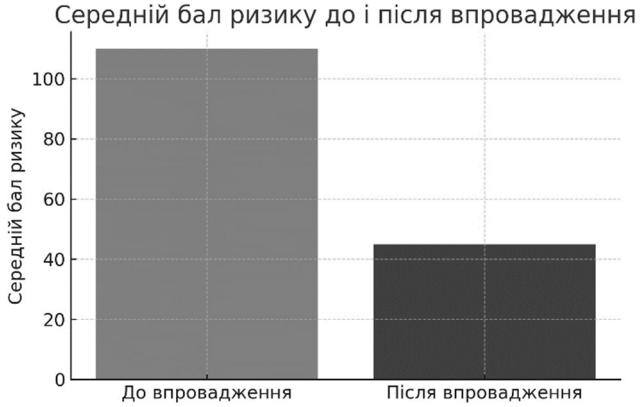


Рисунок 2 – Середній бал ризику до і після впровадження

Figure 2 – Average risk score before and after implementation

Висновки. Розвиток відновлюваної енергетики в умовах цифрової трансформації економіки вимагає якісно нового підходу до управління ризиками [7]. Масштабна інтеграція SCADA, телеметричних платформ, хмарних сервісів, віддалених API для торгівлі енергією та прогнозування генерації формує складне IT-/OT-середовище, де втрата контролю над даними чи збій у процесах може призвести до значних економічних втрат і порушення стабільності енергосистеми. Запропонована модель SURE-RM довела свою ефективність у вирішенні цього виклику, поєднавши класичні принципи управління ризиками зі специфічними потребами ВДЕ-проєктів.

Теоретичне обґрунтування: сформовано наукові передумови для адаптації стандартів ISO 31000, ISO/IEC 27005 та NIST RMF до домену ВДЕ. Визначено ключові чинники ризику – географічна розподіленість активів, залежність від хмарних сервісів, велика кількість підрядників, обмежені можливості фізичного контролю.

Розробка моделі SURE-RM: Виокремлено чотири взаємопов'язані етапи: Scan (ідентифікація активів та загроз), Understand (контекст і вразливості), Respond (розробка стратегій), Evaluate (моніторинг і вдосконалення). Запроваджено кількісний метод оцінки $R = P \times I \times D \times C$, що забезпечує прозору пріоритизацію ризиків.

Практичне впровадження: створено артефакти (реєстр активів, теплові карти, playbooks реагування), що інтегруються з методологіями PMBOK, PRINCE2 та Agile. Розроблено набір KPI (MTTR, RPO, RTO, MFA Coverage) для вимірювання ефективності.

Апробація на СЕС 10 МВт: побудовано каталог 124 активів, ідентифіковано 47 ризиків, із них 12 критичних. Впроваджено багатофакторну автентифікацію, сегментацію мереж, резервне копіювання, SIEM-моніторинг. Скорочено середній час відновлення з 8 до 3 год, знижено критичні ризики на 60 %, досягнуто відповідності політикам безпеки на рівні 88 %. Змодельований економічний ефект показав зниження очікуваних збитків від простоїв більш ніж на 40 %, окупність витрат – менше року.

Методологічні переваги: модель забезпечує єдину «мову ризиків» для технічного персоналу, менеджменту, аудиторів. Сумісність із проєктним підходом полегшує інтеграцію у фази планування, будівництва та експлуатації. Масштабованість дозволяє застосовувати модель як на одиничному об'єкті, так і в портфелі станцій різних типів генерації.

Наукова та практична новизна: новизна полягає в розробці гібридної моделі, що одночасно враховує специфіку IT/OT-ландшафтів ВДЕ та вимоги проєктного менеджменту. Практична цінність – готовність до впровадження у промислових умовах, що підтверджено апробацією на реальній СЕС. Модель дозволяє оптимізувати ресурси, мінімізувати ризики простоїв і підтримувати регуляторну відповідність.

Перспективи подальших досліджень: калібрування ймовірнісних моделей – збір статистики інцидентів на різних типах ВДЕ для формування бази ймовірностей та підвищення точності оцінок. Інтеграція машинного навчання – розробка предиктивних моделей на основі логів SCADA та метеоданих для прогнозування збоїв і підвищення готовності.

Модель SURE-RM продемонструвала, що системне управління IT-ризиками в проєктах відновлюваної енергетики можливе без надмірної складності, якщо застосовувати структурований, життєво-цикловий та практично орієнтований підхід. Її впровадження дозволяє:

- зменшити кількість критичних інцидентів і час простою;
- підвищити операційну стійкість та надійність генерації;
- забезпечити прозорість взаємодії зі стейкхолдерами та аудиторами;
- інтегрувати ризик-менеджмент у щоденні бізнес-процеси.

Подальша робота над автоматизацією, прогнозуванням та економічним обґрунтуванням зробить SURE-RM не лише інструментом контролю, а й ключовим елементом стратегії сталого розвитку енергетичних компаній.

Перелік посилань

1. Семко І.Б., Строкань Д.В., Бєлов О.Є. Project, Program, Portfolio Management. P3M-2022: Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції : [у 2т.]. // Відповідальний за випуск П.О. Тесленко – Том 2. Одеса.: ІШІР, 2022. С. 77–80 с.

2. Строкань Д.В., Ткаченко В.Ф. Модель SURE-RM для управління іт-ризиками в проєктах відновлюваної енергетики матеріали XXII міжнародної конференції «Управління проєктами у розвитку суспільства» Київ: КНУБА, 2025. С. 267-271

3. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 30 p.

4. ISO/IEC 27005, Information technology — Security techniques — Information security risk management, International Organization for Standardization, 2018.

5. National Institute of Standards and Technology (NIST). Framework for Risk Management in Information Technology (RMF). Gaithersburg, MD, 2018.

6. Данченко О.Б., Строкань Д.В., Цифрова енергетика в Україні - розбудова інноваційного майбутнього. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції Project, Program, Portfolio Management. P3M-2024: Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції : [у 2т.]. // Відповідальний за випуск П.О. Тесленко — Том 1. — Одеса.: Інститут штучного інтелекту та робототехніки, 2024.- 255, с.200-205.

7. Приходько, І., Ігнатишин , В., & Приходько , Ю. (2024). Особливості розвитку відновлюваної енергетики в Україні та світі. *Економіка та суспільство*, (62).

INTEGRATION OF THE SURE-RM MODEL INTO THE IT RISK MANAGEMENT SYSTEM OF RENEWABLE ENERGY PROJECTS

Strokan Dmytro V. PhD student, Cherkasy State Technological University, e-mail: StrokanD@gmail.com, tel. +380 93 423 88 02, Ukraine, 18001, Cherkasy, Baydy Vyshnevetskoho St., 34. https://orcid.org/0000-0002-0293-1170

Tkachenko Valentin F., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Cherkasy State Technological University, e-mail: v.tkachenko@chdtu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-7008-7274

Abstract. The rapid digitalization of renewable energy facilities is creating a new class of risks related to information security, data integrity, and operational process resilience. With the growth in solar and wind power plant capacity, integration of intelligent control systems, and remote monitoring channels, the dependence of business indicators on the reliability of IT/OT landscapes is increasing. Existing international risk management standards (ISO 31000, ISO/IEC 27005, NIST RMF) do not fully take into account the geographical distribution of assets, seasonality of generation, hybridity of SCADA infrastructures, and the specifics of interaction with market and meteorological APIs. The article proposes the SURE RM model - a structured, practically oriented approach to IT risk management in renewable energy projects. The model covers the full life cycle: from the formation of an asset register and threat scanning to context analytics, development and implementation of response plans, and evaluation of the effectiveness of the measures taken. Special attention is paid to the semi-quantitative risk assessment method (P×I×D×C), which provides transparent prioritization of scenarios and optimization of costs for countermeasures. The proposed artifacts (asset register, threat catalog, risk heat maps, playbooks) are integrated with PMBOK, PRINCE2 and Agile methodologies, which makes the model compatible with traditional and agile project management. A demonstration example of a 10 MW solar power plant shows practical steps for building a threat map, ranking risks and choosing a response strategy, which allows reducing the average downtime, accelerating SCADA data recovery and reducing financial losses. SURE RM provides structured stakeholder engagement, generates performance metrics (MTTR, RTO, RPO, MFA coverage) and facilitates coordination with external audits. The model can be scaled for a portfolio of facilities of different generation types, supports threat catalog updating and analytics automation. The extended abstract reflects the scientific novelty, practical utility and potential directions for further research, including calibration of probabilistic models based on historical

incidents, development of automated monitoring panels and economic assessment of the effectiveness of countermeasures in the long term.

Keywords: risk management, cybersecurity, renewable energy, SURE-RM, SCADA, OT/IT, ICS, risk assessment, operational resilience.

References

1. Semko I.B., Strokan D.V., Belov O.E. Project, Program, Portfolio Management. P3M-2022: Abstracts of the VII International Scientific and Practical Conference: [in 2 volumes]. // Responsible for the publication P.O. Teslenko – Volume 2. Odesa.: ISHIR, 2022. P. 77–80 p.

2. Strokan D.V., Tkachenko V.F. SURE-RM model for it risk management in renewable energy projects Materials of the XXII international conference “Project Management in the Development of Society” Kyiv: KNUBA, 2025. P. 267-271

3. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 30 p.

4. ISO/IEC 27005, Information technology — Security techniques — Information security risk management, International Organization for Standardization, 2018.

5. National Institute of Standards and Technology (NIST). Framework for Risk Management in Information Technology (RMF). Gaithersburg, MD, 2018.

6. Danchenko O.B., Strokan D.V., Digital energy in Ukraine - development of an innovative future Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Project, Program, Portfolio Management. P3M-2024: Abstracts of the IX International Scientific and Practical Conference: [in 2 vols.]. // Responsible for the publication P.O. Teslenko — Volume 1. — Odesa.: Institute of Artificial Intelligence and Robotics, 2024.- 255, p.200-205.

7. Prykhodko, I., Ignatyshyn, V., & Prykhodko, Yu. (2024). Features of the development of renewable energy in Ukraine and the world. Economy and Society, (62).

УДК 536.5+ 62.4+629.01
UDC 536.5+ 62.4+629.01
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-407-419

ТЕРМОГРАФІЧНА ДІАГНОСТИКА АЕРОДИНАМІКИ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТУ ПІД ЧАС ЇХ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ДИЗАЙНУ

THERMOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF AERODYNAMICS OF TRANSPORT MODELS DURING THEIR CONCEPTUAL DESIGN



Кузьмінець Микола Петрович, *доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну, kuzminecmp@ukr.net, тел. +380442849713,*

https://orcid.org/0000-0002-9636-919X



Дубовенко Юрій Іванович, *кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну, nemishayeve@ukr.net, тел. +380665979384,*

https://orcid.org/0000-0002-8128-5989

Анотація. Представлено результати дослідження аеродинаміки твердотільних моделей транспортних засобів за допомогою термографічної діагностики. Обґрунтовано доцільність використання портативного тепловізора Flir One Pro у поєднанні зі смартфоном як доступного мобільного інструменту для аналізу теплових полів, що виникають під час обдуву моделей гарячим повітрям. Методика полягає у нагріванні поверхні зразків будівельним феном і подальшій візуалізації розподілу температури у вигляді теплових карт, які з певними припущеннями відображають зони підвищеного аеродинамічного опору. Об'єктами досліджень є масштабні моделі автобуса та безпілотних літальних апаратів, виготовлені з пінополістиролу та пластиліну. Якісний аналіз теплових зображень дозволив визначити проблемні ділянки лобового опору, пов'язані з геометричними особливостями формотворення, зокрема спереду корпусу, у вузлах переходу крила до фюзеляжу та виступаючих елементах. Наведено приклади оптимізації конструкцій шляхом зміни конфігурації носових частин, зменшення об'ємності кабін, згладження контуру корпусів та модифікації обтічників. Отримані результати доводять, що і в польових умовах дизайнер може отримати оперативний наочний «зворотний зв'язок» щодо ефективності концептуальних рішень без використання аеродинамічних труб. Методика придатна для ітеративного вдосконалення форм транспортних засобів на ранніх етапах проектування, коли критичними є ресурсозбереження та швидкість реалізації. Висвітлено потенціал поєднання термографії з комп'ютерним моделюванням (SolidWorks, T-Flex, Elcut) для створення енергоефективних та ергономічних транспортних концептів. Стаття заповнює прогалину у літературі, де бракувало опису використання термографічних методів у концептуальному дизайні транспорту, та окреслює напрям інтеграції тепловізійних технологій у практику промислового дизайну.

Ключові слова: Моделювання, термографія, тепловізійне зображення, аеродинамічний опір, портативний тепловізор, концептуальне проектування, БПЛА, модель автобуса.

Вступ: Імітаційне моделювання – це метод дослідження, заснований на тому, що система, яка вивчається, замінюється *імітатором* і з ним проводять експерименти з метою отримання інформації про цю систему. Експериментування з імітатором називають *імітацією* (імітація – це вияснення суті

явища, не вдаючись до експериментів на реальному об'єкті). Досліджувана система замінюється моделлю (як правило, в значно меншому масштабі), яка достатньо точно описує реальну систему, над нею проводять експерименти з метою отримання інформації про цю систему. До імітаційного моделювання вдаються, коли: дорого або неможливо експериментувати на реальному об'єкті; неможливо збудувати аналітичну модель; необхідно імітувати поведінку системи в часі. Мета імітаційного моделювання полягає у відтворенні поведінки досліджуваної системи на основі результатів аналізу істотних взаємозв'язків між її елементами (симуляція предметної області для проведення експериментів). Імітаційне моделювання поділяється на *дискретне*, *агентне* і *систему динаміку*. В техніці, у тому числі для моделювання транспортних технологій і виробничих процесів найчастіше застосовують дискретне моделювання. Воно абстрагується від неперервної природи явищ і розглядає основні події модельованої системи: очікування, обробка, рух, розвантаження тощо.

В транспортній техніці, *імітаційні моделі* у визначеному масштабі (1:10, 1:20, 1:25 тощо) створюють зі спеціальних матеріалів для формотворення. Щоб оцінити *аеродинамічну* ефективність форми, моделі піддають випробуванню в промисловій *аеродинамічній трубі*. В разі недоступності промислового зразка його замінюють самотужки виготовленим зменшеним аналогом, а генератор вітрового потоку замінюють на *будівельний фен*. Останній за рахунок швидкого нагрівання піддослідної моделі дозволяє за допомогою портативного *тепловізора* виміряти розподіл *теплового опору* на різних поверхнях моделі. З певним відомим рівнем припущень такий розподіл можна вважати еквівалентним розподілу тертя *лобового опору* при аеродинамічному обдуві моделі. Результати вимірів теплового поля за допомогою тепловізійного знімання автоматично *візуалізують* у вигляді теплової карти.

Застосування термографічної діагностики в концептуальному дизайні транспортних засобів відкриває нові можливості для оптимізації форми та функціональності на ранніх стадіях проектування. Концептуальний дизайн, що включає генерацію ідей, концептуальне опрацювання, ескізування, макетування, тривимірне моделювання та візуалізацію, значно виграє від впровадження термографічних методів дослідження аеродинаміки. На етапі макетування, коли фізична форма концепції вперше матеріалізується, термографічна діагностика дозволяє дизайнерам швидко виявити проблемні зони з сильною лобовою опорою та оптимізувати обтічність форми, не вдаючись до дорогих повномасштабних випробувань. Це важливо при розробці інноваційних транспортних концепцій, де нетрадиційна геометрія потребує аеродинамічного аналізу. Інтеграція термографічної діагностики в процес концептуального дизайну економить час і ресурси, сприяє створенню енергоефективних транспортних засобів, що відповідає функціональним, технічним, технологічним та естетичним вимогам сучасного дизайну. Візуалізація теплових карт є потужним комунікаційним інструментом, який дозволяє дизайнерам обґрунтовувати свої рішення перед замовником, демонструючи науковий підхід до формування транспортних засобів.

Термографічна діагностика аеродинаміки базується на зв'язку між тепловим опором поверхонь моделі та аеродинамічним опором при обтіканні потоку повітря. Коли модель транспортного пошкодження піддається впливу нагрітого повітряного потоку, розподіл температури на її поверхні виявляє особливості взаємодії з цим потоком. Ділянки з підвищеним аеродинамічним опором демонструють характерні теплові профілі, які фіксуються за допомогою тепловізора та трансформуються у видимі теплові карти. Використання портативних тепловізорів у поєднанні з простими генераторами повітряного потоку, наприклад будівельний фен, робить цю методику доступною на ранніх стадіонах концептуального дизайну, коли традиційні аеродинамічні труби можуть бути недоступними через обмеження бюджету чи технічні складності. Хоча така методика має певні обмеження в точності відповідно до промислових аеродинамічних випробувань, вона дає достатню інформацію для ітеративного вдосконалення форми транспортного потенціалу на концептуальному етапі. Особливо важливим є застосування термографічної діагностики при розробці електричного транспорту, де аеродинамічна ефективність впливає на ходу та енергоспоживання, що є критичними характеристиками для споживача.

Постановка проблеми. Основні поняття термографії. В термографії оперують базовими поняттями – тепловізор, термограма, теплова карта тощо. Дамо коротку характеристику цих понять і термінів.

Тепловізори (тепловізійні, інфрачервоні камери) – це оптично-електронні прилади для дистанційного контролю та виявлення об'єктів, які випромінюють тепло. Зазвичай вони споряджаються об'єктивом, приймачем *інфрачервоного* випромінювання (матрицею), дисплеєм, органами управління та портами виводу інформації на ПК, незалежними елементами живлення, тощо. Обладнання працює за принципом *термографії*, що надає можливість виявляти і фіксувати джерела теплового випромінювання незалежно від зовнішніх умов. Саме ця якість вигідно відрізняє тепловізори від приладів *нічного бачення*, у яких функціональна можливість безпосередньо залежить від освітленості, наявності опадів тощо. На сьогодні тепловізори є найбільш досконалим засобом контролю та реєстрації температурних та *теплових полів*. Сучасні навіть недорогі тепловізори стали невід'ємним атрибутом навігації літальних апаратів, систем наведення, в роботі будівельників, для мисливців, медиків, науковців, прикордонників, спостерігачів військової розвідки, служб спеціального призначення тощо. В нашій країні доступний модельний ряд тепловізорів [1].

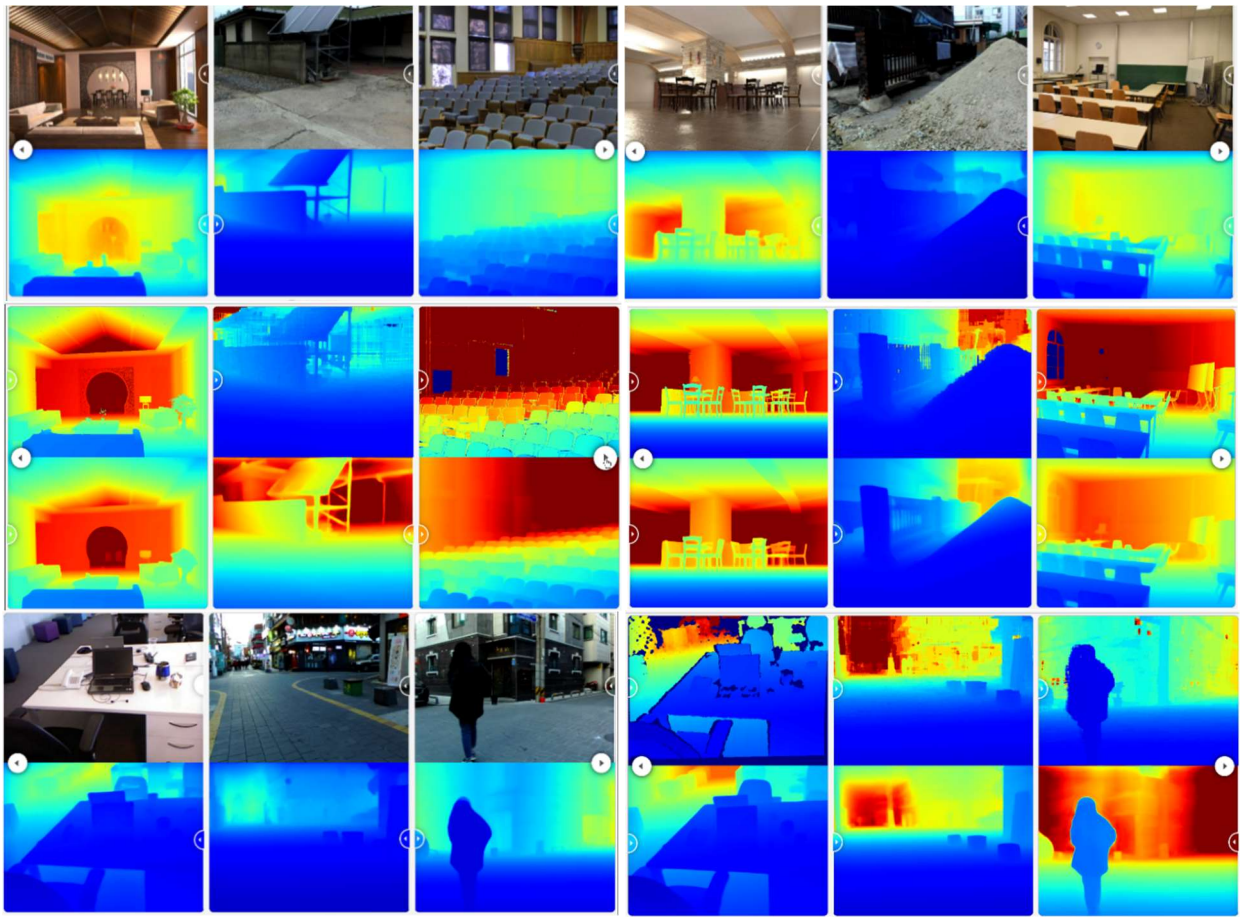


Рисунок 1 – Теплові поля зовні і всередині приміщень: різниця у роздільній здатності термограми за різних налаштувань температурного діапазону тепловізора.

Figure 1 – Thermal fields outdoor and indoor: difference in thermogram resolution at different temperature range settings of the thermal imager.

Тепловізійне обстеження – це знімання споруд або окремих конструкцій тепловізором в *інфрачервоному* діапазоні. В результаті знімання генерується термограма об'єкта, де показана миттєва

середня температура в різних точках його конструкції (це знімок об'єкта в інфрачервоному спектрі випромінювання, накладений на *контури* об'єкта). Нерівномірність її *розподілу* вказує на наявність дефектів, які або вже стали або скоро стануть причиною проблем, або ж тих місць, які потребують удосконалення. Отримана *термограма* показує градацію *спектральних кольорів*, що складаються з температурних полів, які відповідають реальному градусному діапазону об'єкта [2].

Теплова карта (англ. *heatmap*) – графічне представлення даних, при якому окремі значення що містяться в матриці, представлено у вигляді кольорів. Такий спосіб представлення даних придумали давно і, мабуть, наочний його приклад – це *карта температур* під час прогнозу погоди. Крайні значення відповідають синьому і червоному кольорам, а комфортні значення відповідають зеленому кольору. Аналіз теплових карт іноді призводить до інсайтів або виявлення *аномалій*, які непомітні під час аналізу інших форматів даних.

Теплові карти – ефективний і наочний спосіб візуалізації даних у випадках, коли потрібно показати *ступінь зміни* параметра у заданому просторі *якісно* – за допомогою кольору. Тобто, конкретні числові значення перетворюються на кольори. І ці числові значення прив'язані до будь-якої точки чи зони. Інженери використовують *теплові карти* при аналізі деталей у 3D на міцність, візуалізують результати моделювання інших навантажень і процесів.

Також теплові карти використовують в обробці зображень з великим *динамічним діапазоном* для оцінки стартової метричної глибини кадра. Ця проблема є складною, якщо невідомі параметри камери, бо тоді важко оцінити різницю в RGB і глибині кадрів через неоднозначність шкали глибини. Модель дифузії використовує для оцінки *глибини кадру* його теплову карту та кілька інновацій – логарифмічна параметризація глибини, обмеження поля зору (для обробки неоднозначності масштабу) і синтетичне *доповнення поля зору* під час навчання (для узагальнень поза обмеженнями камери в навчальних даних). Метод знижує на 25% похибки у кадрах у приміщенні та 33% у кадрах на вулиці, за малу кількість кроків усунення шумів [3]. Результати поліпшення таких теплових карт ви можете бачити на наступних знімках (рис. 1).

Аналіз публікацій і досліджень. У зовсім іншому масштабі теплові карти формують за даними *спектральних* супутникових знімків для аналізу *зон тепла* всередині міст. Так, за висновками дослідження [4], в межах острова тепла над містом Київ розподіл температури залежить від ландшафтно-функціональної структури міста – від ступеня нагрівання і випромінювання земних покривів, їх співвідношення та змін у часі. За тепловими картами, отриманими при обробці знімків супутника **Landsat** вчені виявили, як і де відбуваються зміни температури поверхні землі в нашій столиці.

Аналізуючи розподіл температур у часі за понад 30 років уздовж профілів, які перетинають промислові території Києва, вони виявили, що ці зони мають підвищений рівень тепла на поверхні землі і завдячують цим збільшенням площі *асфальтованих* поверхонь. Високі прирости температур зафіксовані на околицях міста в місцях нового житлового будівництва і знищення природних ландшафтів, і це розширило межі теплового острова Києва. Аналіз наземної температури за сезонами показав, що *теплові аномалії* над виробничими зонами є постійними, але влітку їх амплітуда коливається між виробничими і лісопарковими зонами на 15°C.

Інші приклади використання тепловізійного знімання стосуються вирішення задач енергозбереження, технічного моніторингу, неруйнівного контролю матеріалів і устаткування, медичної термографії, екологічного моніторингу, криміналістики, митного контролю, сільського господарства, наукових досліджень тощо. В нашій країні на науковому рівні цим займається фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Вєркіна НАН України. Деталі перелічених вище напрямків застосування результатів аналізу теплових полів можна побачити на його сайті [5].

В реальному дизайн-процесі термографічна діагностика виконується циклічно. Спочатку створюється первинна модель на основі концептуальних ескізів, яка піддається діагностиці. Отримані результати аналізуються, після чого в конструкцію вносяться зміни, і повторюються. Така ітеративна методика дозволяє збільшити оптимізацію аеродинамічних характеристик, наближаючи їх до бажаних параметрів. Для концептуального дизайну транспортних засобів особливо важливі зони переходу між

функціональними елементами конструкції, де часто виникають турбулентні потоки. Індивідуальна термографічна діагностика дозволяє виявити такі проблемні зони і скоригувати форму для забезпечення плавних переходів та зниження опору.

Чисельний аналіз теплових полів. Останні 20 років, завдяки розвитку комп'ютерних технологій, чисельний аналіз розподілу теплових неоднорідностей здійснюють за допомогою комп'ютерного моделювання у *спеціалізованих* математичних та інженерних прикладних системах. У цих системах реалізовані різні алгоритми обчислень розподілу теплового поля, що базуються на математичних моделях різного ступеня точності.

Математичну модель теплових полів описує *рівняння теплопровідності* з крайовими умовами. Це *нелінійне* диференціальне рівняння у частинних похідних 2-го порядку, яке залежить від теплопровідності, теплової дифузії, густини матеріалу, питомої теплоємності, інтенсивності джерела тепла і часу теплової взаємодії. Його частинні випадки для різної форми *джерела тепла*, що діє на однорідний об'єкт, наприклад, мікросхему, наведено у праці [6]. Складніша математична модель для опису нестаціонарного теплообміну у складових теплозахисних конструкціях наведена в праці [7]. Дещо популярніше математичний аналіз *теплового обміну* викладений у посібнику [8].

Аналіз теплових полів можна проводити також за допомогою спеціальних програмних середовищ, наприклад, **Elcut**, **SolidWorks** або **Ansys**, які реалізовують *скінченно-елементні* алгоритми для обчислення та візуалізації теплових полів. Наприклад, саме таким чином аналізується поле температур у приміщенні при роботі систем кондиціонування при змінних теплових навантаженнях цього приміщення у статті [9]. А як це зробити саме в популярному серед дизайнерів у транспортній галузі програмному середовищі **SolidWork**, розказано тут [10]. Обчислення температурних полів у програмі **Elcut** теж нескладне [11], [12].

Проте існує доступніший програмний засіб для комп'ютерного моделювання теплових полів, **T-Flex Аналіз**. T-Flex Аналіз – це інтегроване в **T-Flex CAD** середовище кінцево-елементних розрахунків, яке дає можливість математично моделювати фізичні явища й вирішувати практичні завдання у практиці проектування. Усі розрахунки ведуться методом кінцевих елементів, а між тривимірною моделлю виробу і її кінцево-елементною моделлю підтримується *асоціативний зв'язок*. Це означає, що параметричні зміни твердотільної моделі автоматично переносяться на сіткову кінцеву елементну модель. Система T-Flex Аналіз дозволяє виконати 4 види аналізу: *статичний*, *частотний*, *тепловий* та аналіз *стійкості*.

• Статичний аналіз дозволяє обчислити напружено-деформований стан конструкцій під дією прикладених до них постійних у часі сил, і врахувати напруги, що виникають через температурне розширення / стиснення матеріалу або *деформації* конструкції на величину відомих зміщень. У модулі «Статичний аналіз» можна оцінити *міцність* розробленої конструкції з *допустимих напруг*, визначити *вразливі місця* конструкції і внести необхідні зміни, щоб оптимізувати виріб.

• Частотний аналіз дозволяє розрахувати власні (резонансні) частоти конструкції і відповідних форм коливань і виявити резонансні частоти у робочому частотному діапазоні виробу та підвищити надійність виробу, оптимізуючи конструкцію таким чином, щоб унеможливити виникнення *резонансів*.

• Аналіз стійкості важливий для проектування конструкцій, експлуатація яких передбачає тривалі навантаження різної *інтенсивності*, і дозволяє оцінити запас міцності за «критичним навантаженням». Під дією критичного навантаження в стислих зонах конструкції можуть стрибкоподібно виникнути значні непружні деформації, що часто призводять до її руйнування або серйозного пошкодження.

• Тепловий аналіз забезпечує можливість оцінки температурної поведінки виробу під впливом *джерел тепла* та випромінювання і може використовуватися для розрахунку температурних або теплових полів за обсягом конструкції, і спільно зі статичним аналізом для оцінки *температурних деформацій* у виробі. Тепловий аналіз за допомогою програми T-Flex Аналіз описаний у праці [13].

Існує й безкоштовний аналог для теплових розрахунків. Так, розрахунок температурного поля за програмою **Therm** наведений у праці [14].

Методика досліджень. ***Отримання даних***: В даному експерименті для вимірювання теплового поля (розподілу температур по *нерівній* поверхні моделі) використали портативний тепловізор **Flir One Pro** для смартфона на базі ОС Android. Завдяки покращеному 4-кратному тепловому розширенню і обробці зображень VividIR™, Flir One Pro дає можливість бачити більше деталей, більш безпечно працювати з обладнанням під напругою. Функція Flir One Pro **MSX** формує візуальне зображення на дисплеї смартфона, працює у видимому спектрі, рельєфно накладає значення мінімальної та максимальної температури поверх теплового зображення в *інфрачервоному* спектрі. Таким чином, одержувана картина більш інформативна, ніж якби зображення у видимому і інфрачервоному спектрах були рознесені. Апарат забезпечує температурний діапазон від –20° до 120°С. Роз'єм **OneFit** дозволяє підключати Flir One Pro до телефону або планшета через USB-C. Пристрій стійкий до падіння з висоти 1.8 м.

Мобільний додаток Flir One має додаткову функцію експонометра, яка фіксує на зображенні теплового поля *середню* температуру в *контрастних* ділянках простору. Точність *експонометра* залежить від багатьох чинників, у тому числі від відстані до моделі, температури довкілля і випромінювальної здатності матеріалу моделі.

Методика експерименту. Здійснено дослідження *інтенсивності* теплообміну та аеродинамічного опору на поверхні кількох моделей транспорту, а саме: 1 модель автобуса в масштабі 1:50 і 2 моделі дронів літакового типу в масштабі 1:10 і 1:5 відповідно. Масштабні моделі виготовлені з пінополістиролу та обліплені скульптурним пластиліном з наданням їм необхідної форми. Ці моделі розташовувались на горизонтальній твердій поверхні (столі) на вузькій пінопластовій підставці, яка відділяла їх від поверхні стола. Інформаційно-вимірювальний комплекс складався з портативного тепловізора **Flir One Pro** та смартфона **Poco F4**. Експерименти виконані на відкритому повітрі (без проточної аеродинамічної труби). В якості *робочого середовища* використовується повітря лабораторного приміщення.

Перед початком експерименту тепловізор **Flir One Pro** був відкалібрований вручну, щоб вибрати оптимальний динамічний діапазон, який забезпечить найкращу роздільну здатність знімання за даних лабораторних умов. З цією метою ми віднайшли максимально *термально* контрастні об’єкти та відзняли їх кілька разів, щоразу регулюючи чутливість приладу за допомогою відповідної кнопки на його корпусі. Такими об’єктами виявились компоненти системи обігріву приміщення, їхні теплові знімки з нанесеними миттєвими *середніми* температурами наведені на рис. 2.

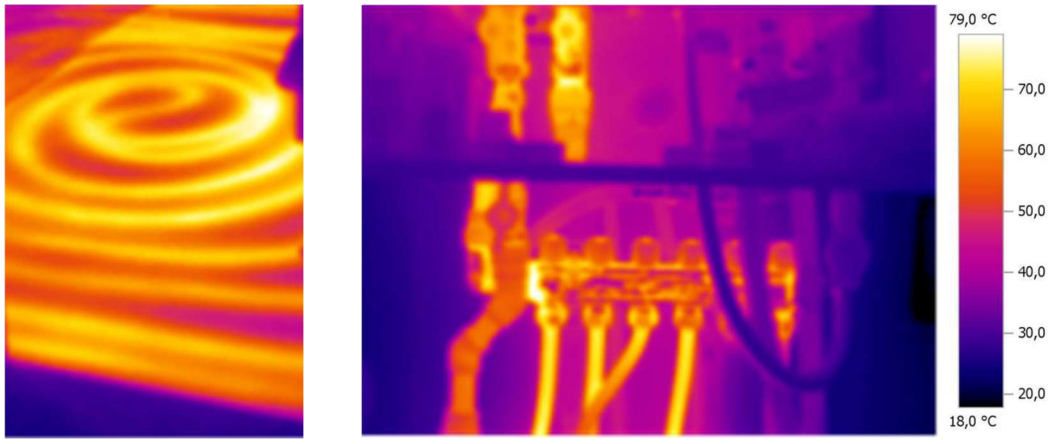


Рисунок 2 – Підсумок калібрування електронно-оптичного тепловізора *Flir One Pro* на термально контрастних об’єктах: діапазон температур понад 10° С відповідає нормальному режиму експлуатації системи обігріву і вказує на оптимальне налаштування приладу.

Figure 2 – Calibration result of the *Flir One Pro* electron-optical thermal imager on thermal contrast objects: the temperature range of more than 10° C corresponds to the normal operating mode of the heating system and indicates the optimal setting of the device.

Спочатку фіксувалась стартова теплова карта для кожної моделі, а потім така модель прогрівалась будівельним феном на протязі 1 хвилин уздовж основних поверхонь лобового опору. Після цього знову вимірювався в додатку Flir One розподіл температури на цих поверхнях. Вимірювання проводилось при кімнатній температурі, ~18° С. В разі низької контрастності теплового поля (особливо на моделях більшого розміру) об'єкти догрівались, і повторно вимірювалось теплове поле. В результаті вимірювань сформовано альбом теплових зображень, які потім піддавались якісному аналізу по типу "вища температура поверхні моделі еквівалентна її вищому аеродинамічному опору".

Підставою для такого підходу є істотний вплив *геометричних* параметрів трубчастих поверхонь на їхні теплові характеристики та аеродинамічний опір, вивчений у праці Кондратюка В.А. про теплообмін і аеродинаміку пучків плоскоовальних труб в поперечному потоці [15].

Результати досліджень та їх обговорення

Результати аналізу: Теплові зображення, отримані за допомогою тепловізора, як правило, аналізують за допомогою кількісних або якісних методів. Кількісний аналіз вимагає, щоб при вимірюванні була визначена *істинна* температура об’єкта дослідження. Але істинна температура може бути отримана лише за умови встановлення вірного значення коефіцієнта *випромінення* поверхні об’єкта і врахування відбиття й пропускання інфрачервоного випромінення. Ці фактори є суттєвою перешкодою для точного визначення температури навіть при вірно визначеному коефіцієнті випромінення через те, що на практиці їх дуже важко оцінити кількісно. Кількісний аналіз є складним завданням і частіше застосовується у промисловості для точного вимірювання температури *виробничих процесів*.

Якісний аналіз, на відміну від кількісного, не вимагає будь-яких абсолютних вимірювань температури. Замість точних значень в центрі уваги знаходяться розподіл і *відносні зміни* температури. Цей тип аналізу є найбільш поширеним при обстеженні будівель, коли основною метою є виявлення витоків повітря, *дефектів* ізоляції або інших будівельних недоліків, які викликають відхилення температури від деякого базового рівня. Так саме і при обстеженні промислових об’єктів, для виявлення дефектів часто достатньо порівняння теплових картин двох *схожих* елементів, що працюють в однакових умовах. Точно визначати коефіцієнти випромінення і температуру об’єктів для цього нема потреби. Приклади *якісного аналізу* наводяться у навчальному посібнику "Основи термографії" [16].

Конкретні результати вимірювань наведено на рис. 3-6. Наведемо *якісний* аналіз для кожної моделі.

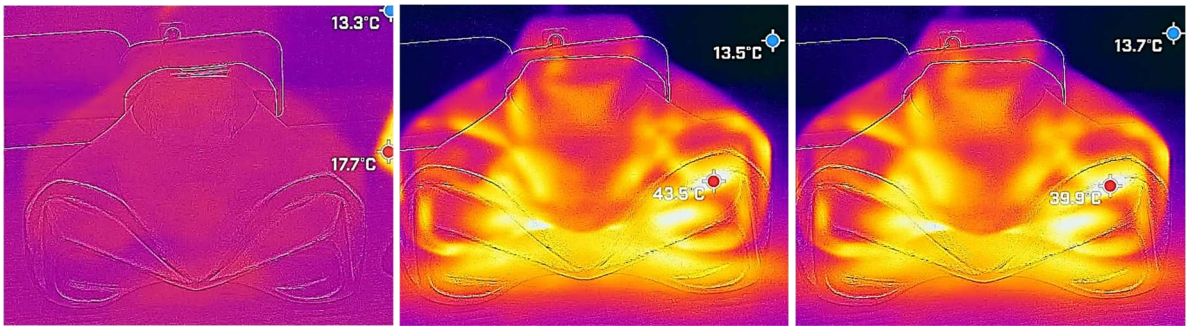


Рисунок 3 – Теплове поле моделі спорткара: зліва – початковий стан, решта – після завершення термодинамічного випробування.

Figure 3 – Thermal field of a sports car model: on the left – initial state, the rest – after completion of the thermodynamic test.

Зокрема, на рис. 3 очевидно, що області з найбільшою *інтенсивністю* світіння (*проксі* канал температурного нагріву) припадають на обтічники бампера та лонжерони спорткара зі складною

метеликоподібною формою. За відсутності наскрізного проходу повітря вони чинять аномально високий лобовий опір, особливо в заглиблених гніздах фар. Саме на це вказує максимальний градієнт температур в області бампера. Інша область підвищеного опору повітря припадає на вузьку передню частину кабіни, яка вивищується над хвилястою поверхнею капота як кокпіт давнього літака-винищувача. Очевидно, надмірне захоплення автора моделі аеродинамічними формами кінця 1950-х років, які давно себе вичерпали з точки зору ефективності, на призвело до успіху, але очевидно це стало лише після експерименту.

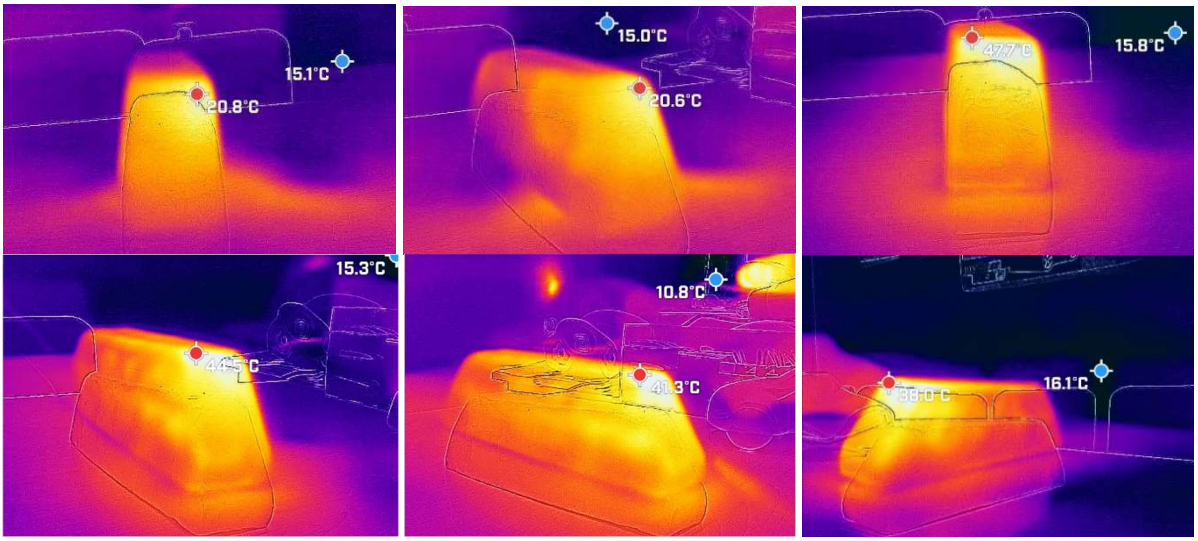


Рисунок 4 – Теплове поле моделі автобуса: різні етапи термодинамічного випробування.
Figure 4 – Thermal field of a bus model: different stages of thermodynamic testing.

На рис. 4 максимальний градієнт лобового опору, на який вказає яскрава пляма, припадає на завищену лобову частину кабіни автобуса, у якій автор намагався розмістити додатковий багаж, або джерела енергії. З точки зору оптимальної аеродинаміки така форма кабіни є невдалою, як і випуклі назовні бічні поверхні уздовж нижньої частини корпусу. Зрештою, термограма навіть фіксує опір утоплених вглиб салону округлих вікон, що нагадують ілюмінатори літака. Тут так само захоплення формами, властивими кінцю 1960-х років, не є виграшною стратегією для моделі. Отже, дизайн є ефектним, але не ефективним (візуалізація ліній току, наприклад, у SolidWorks, дозволить унаочнити це переконливіше).

На рис. 5 представлена теплова карта для моделі малого турбогвинтового дрона з хвостовим розміщенням гвинта у захисній круговій гондолі. Розподіл температур, за припущенням еквівалентний розподілу лобового опору, показує максимуми у трьох областях: тупоносий обтічник носової частини корпусу; овальний виступ спереду, що нагадує кабіну лайнера; круговий кожух захисної гондоли двигуна. Очевидні рекомендації полягають у загостренні носової частини, *згладженні* верньої частини корпусу та зміні форми заднього обтічника двигуна. Його нижню частину доцільно взагалі прибрати, а у верхній змінити кут і положення фіксаторів.

Рис. 6 демонструє теплову карту для планера дрона далекого радіуса дії, розробка яких є актуальною в умовах активної протидії російській агресії. В даному випадку розподіл світлових областей також вказує на проблеми з аеродинамікою носової частини та потребу в її вдосконаленні. Також проглядаються області підвищеного опору у точках примикання передньої частини крила до корпусу, що вказує на потребу її звуження до середини корпусу. А решта форми корпусу є “холодною” і показує прийнятну аеродинаміку.

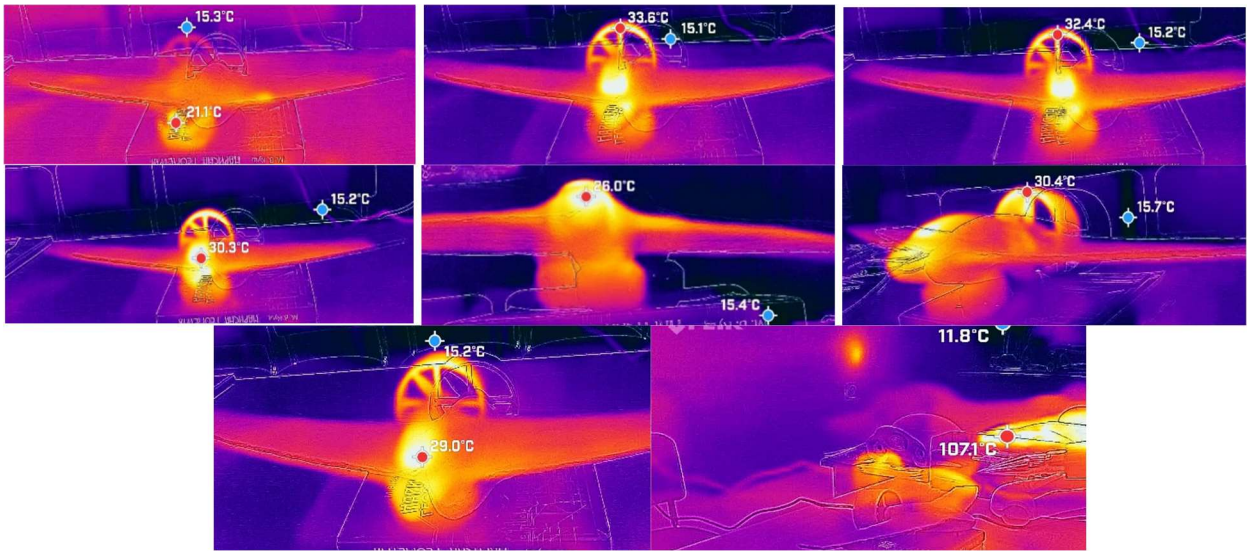


Рисунок 5 – Теплове поле моделі турбогвинтового дрона: різні етапи термодинамічного випробування.

Figure 5 – Thermal field of a turbopropeller drone model: different stages of thermodynamic testing.

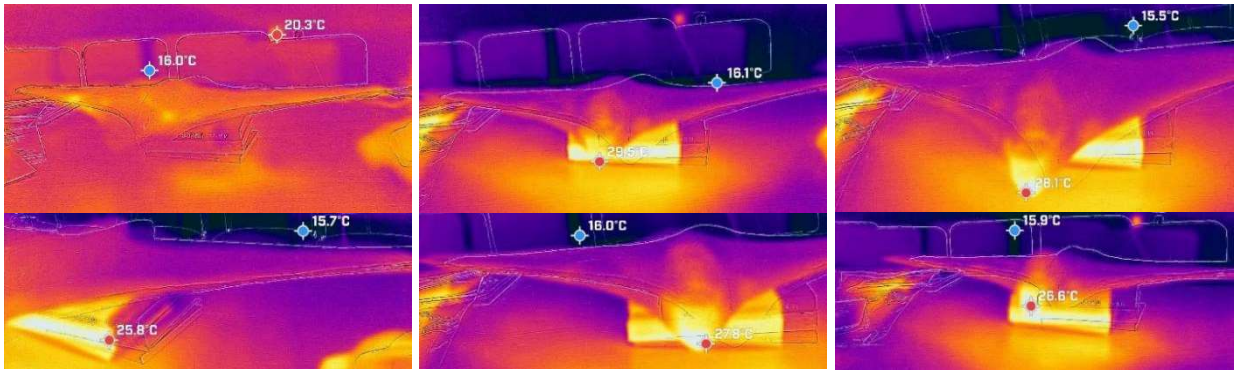


Рисунок 6 – Теплове поле моделі планера дрона далекої дії: різні етапи термодинамічного випробування.

Figure 6 – Thermal field of a long-range drone airframe model: different stages of thermodynamic testing.

Обговорення результатів: Чисельний аналіз теплового розподілу по поверхні моделі як результат *газодинаміки* потоку нагрітого повітря уздовж її поверхні, зручно робити в програмному комплексі **SolidWorks Flow Simulation**. За попередніми результатами аналізу можна зробити висновок про ефективність форми за продувкою з фронтальної сторони на основі отриманих параметрів розподілу температури і теплового потоку. Проаналізовані причини зниження *теплового розсіювання* виробів, і виявлені місця для удосконалення конструкції з точки зору ергономіки та аеродинаміки.

Грунтуючись на *аналогії* принципів роботи *аеродинамічної труби* і *будівельного фену*, за стартову точку дослідження обрана задача *оптимізації* передньої частини моделей, яка підлягає найбільшому лобовому опору. Визначальними критеріями для такої оптимізації є різниця *теплопередачі* фронтальної та бічних поверхонь кожного з досліджуваних виробів, що яскраво проявляється у *неоднорідній* картині *градієнта* теплового поля.

При оптимізації форми виробу за критерієм *тепловіддачі* до повітря встановлено, що при малих значеннях кута розвороту моделі, коефіцієнт тепловіддачі до повітря має тенденцію до збільшення. Точка екстремуму функцій, для всього діапазону *швидкостей* потоку, доводиться на кут розвороту моделі 15°. Подальше зниження інтенсивності *теплообміну* пояснюється впливом зони втраченого

теплообміну. Після *оптимізації* моделі отримано позитивний ефект тепловіддачі нової форми на ~10% порівняно з початковою формою. При оптимізації розмірів моделі за критерієм *динамічного опору* руху повітря встановлено, що зі збільшенням кута нахилу *фронтальної* поверхні моделі автобуса (зменшенням площі поверхні опору повітря) *градієнт* температури (а отже й лобовий опір) спадає.

При оптимізації фронтальної поверхні моделі автобуса за критерієм *аеродинамічного опору* повітрю доцільно спроектувати кілька варіантів такої поверхні з різним кутом атаки повітря і площею фронтальної поверхні. Це дасть змогу обрати кращий варіант за результатами *статистичного аналізу* варіантів. При проектуванні конструкції виробу доцільно виходити з властивостей *уніфікації* його основних вузлів і фрагментів. В даному випадку, особливу роль відіграють геометричні параметри фронтальної частини, а саме її висота і ширина. Конкретні числові значення відповідних параметрів виходять за рамки даного експерименту.

Висновки: Проведено літературний огляд методів вимірювання та аналізу теплових полів. Описані методи моделювання теплових полів, інструменти для їх вимірювань тощо. Охарактеризовано методику теплового обдуву моделей транспорту з метою імітації теплового навантаження як альтернативного проксі-аналога аеродинамічного тиску для визначення лобового опору моделі потоку повітря, що набігає.

Розроблена спрощена методика вимірювання та аналізу теплових полів на поверхні зменшених у певному масштабі моделей автобуса та дронів різної форми, які є предметом дослідження в *кваліфікаційній роботі* магістрів дизайну.

Результати вимірювання та якісного аналізу теплових полів розрізняються для моделей достатнім чином, щоб виокремити області *підвищеного опору*, які потребують уточнення форми згідно оптимальних аеродинамічних та ергономічних характеристик кожної моделі. У тепловому полі чітко проявляються *контури* фронтальних та торцевих стінок моделі згідно перепадів температури після обдуву гарячим повітрям на протязі 1 хвилини. Результати експериментального вимірювання температури моделей розрізняються для максимальної температури активного елементу і для виступів та накладок в діапазоні до 12% від *теплового фону*.

Загальна картина розподілу температури на поверхні виробів дозволяє зробити попередні висновки про необхідні зміни у форму передньої частини корпусу кожної моделі, необхідні для того, щоб зменшити її лобовий опір та покращити аеродинаміку, виходячи із площі перегріву найбільш нагрітої частини поверхні виробів. Також це означає, що, загалом, компактний тепловізор **Flir One Pro** цілком придатний для простих експериментів з *якісного аналізу* теплового поля твердотільних моделей транспортних засобів після їх обдуву гарячим повітрям. Отже, отриманої теплової картини *розподілу температур* достатньо для якісного (*порівняльного*) аналізу аеродинамічних характеристик таких моделей в умовах навчальної лабораторії.

Ефективність використання *дизайнерських* засобів зменшення температури *розігріву* моделі шляхом зміни її форми може бути оцінена лише після проведення *повторного* тепловізійного знімання та аналізу його теплового поля. Можливо, таких ітераційних етапів з удосконалення форми виробів знадобиться кілька, принаймні, не менше 3 спроб. Лише тоді можна буде порівняти зміни у відсотковому відношенні.

Термографічна діагностика аеродинаміки моделей транспорту при їх концептуальному дизайні є потужним інструментом, що дозволяє оптимізувати аеродинамічні характеристики на ранніх стадіях проектування. Ця методика забезпечує швидкий зворотний зв'язок для дизайнерів, дозволяючи ітеративно вдосконалювати концепцію без потреби в дорогих повномасштабних випробуваннях. Інтеграція термографічної діагностики в процес концептуального дизайну забезпечує створення більш ефективних, екологічних та інноваційних транспортних засобів, що відповідають вимогам сучасного суспільства. У майбутньому, з розвитком технологій термографії та методів аналізу даних, ця методика має потенціал стати більш точною та інформативною, відкриваючи нові можливості для транспортного дизайну.

В рамках розвитку принципів відкритої науки основний зміст даної публікації, що відображає суть результатів звіту про індивідуальне науково-дослідне завдання для комплексного проектування автотранспорту для магістрів першого року навчання, перебуває у відкритому доступі [17].

Перелік посилань

1. Тепловізори DALI: висока якість і доступність для споживача. *Маркет вимірювальних приладів "Simvolt"*. Блог. Київ, 2020.. URL: https://simvolt.ua/teplovizori-dali-visoka-yakist-i-dostupnist-dlya-spozhivacha/.
2. Обстеження будівлі тепловізором. *ТзОВ МСП "Промматеріал"*. Львів, 2023. URL: http://prommaterial.com.ua/obstezhennia-budivli-teplovizorom.html.
3. Saurabh Saxena, Junhwa Hur, Charles Herrmann, Deqing Sun, David J. Fleet. Zero-Shot Metric Depth with a Field-of-View Conditioned Diffusion Model. *Computer Science*. 2023. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.13252. URL: https://diffusion-vision.github.io/dmd/.
4. Ліщенко Л.П. Моніторинг теплового поля поверхні колишніх виробничих зон і промислових об'єктів м. Київ за супутниковими даними. *Укр. журнал дистанційного зондування Землі.* 2020. №25. С. 17–27. DOI: 10.36023/ujrs.2020.25.172. URL: https://ujrs.org.ua/ujrs/article/download/172/191
5. Аналізатори теплових полів. *ФТІНТ ім Б.І. Вєркіна НАН України*. Харків, 2023. URL: https://ilt.kharkiv.ua/bvi/technology/atp/atp_u.htm
6. Кудикіна Т.О., Гончаренко В.О., Кузьменко І.В. Дослідження теплових полів у мікросхемах. *Актуальні проблеми навчання та виховання людей з особливими потребами*: Зб. наук. праць. С. 374-382. URL: https://ap.uu.edu.ua/article/594
7. Веселовський В., Берлов О. Розрахунок температурних полів складених конструкцій. *Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту*. 2008. Т. 13, № 1. С. 161-170. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/186563362.pdf
8. Ванєєв С.М. Комп'ютерне моделювання динамічних систем. Практикум. Тепловий аналіз ущільнень. Суми: СумДУ, 2019. URL: https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content-/lectured:5ad1fb886b43a18f3b33894d16dcd2798afb3ed2/latest/859110/КМДС_л_6_.pdf
9. Москвітіна А., Шишина М. Дослідження поля температур у приміщенні при роботі систем кондиціонування при змінних теплових навантаженнях приміщення. *Молодий вчений*. 2020. № 3(79). С. 186-192. DOI: https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-40. URL: https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/1464.
10. Виконання міцнісного розрахунку на основі даних попереднього теплового аналізу в Ansys Workbench Mechanical. Блог. *Софт Інжиніринг Груп*., Київ, 2016. URL: https://-www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/154-vypolnenie-prochnostnogo-rascheta-na-osnove-dannykh-predvaritelnogo-teplovogo-analiza-v-ansys-workbench-mechanical.html.
11. Розрахунок температурних полів у програмі Elcut. *Портал Хайтек*. М., 2023. URL: https://haitek.ru/products/raschet_temperaturnogo_polya.php
12. Дубицький С.Д. Elcut – скінченно-елементний аналіз електромагнітних і температурних полів. IsiCAD – ваше вікно у світ САПР. *Інж. портал*. М., 2023. URL: https:/-/isicad.ru/ru/articles.php?article_num=22698
13. T-Flex Аналіз. Керівництво користувача: Тепловий аналіз. М: Топ-Системи, 2009. С. 39-40. URL: https://studfile.net/preview/5048969/page:39/
14. . Сергєйчук О.В. Будівельна фізика. Будівельна теплотехніка огороджувальних конструкцій будівель. *Лабор. практикум*. Розрахунок опору теплопередачі за програмою Therm. Київ: КНУБА, 2020. 40 с. URL: https://org2.knuba.edu.ua/pluginfile.php/106684/mod_folder/content/0/Лабораторна%20робота.Розрахунок%20за%20програмою%20THERM.ppsx
15. Кондратюк В.А. Теплообмін і аеродинаміка пучків плоскоовальних труб в поперечному потоці. Дис. … к.т.н. Київ: НТУУ КПІ, 2016. 1977 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/-123456789/15801/1/Kondratyuk_dis.pdf
16. Махотіло К.В., Лисенко Л.І., Булгаков О.В. Основи термографії: навч. посіб. Харків: ФОП Панов А.М., 2021. 106 с. ISBN 978-617-7947-76-8. URL: https://repository.-kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/e7345a4e-e63f-451e-809f-ba951c84a96e/content
17. Дубовенко Ю.І., Кузьмінець М.П., Розовенко А.І., Старусьова М.Ю. Якісний аналіз аеродинаміки твердотільних моделей транспорту за допомогою тепловізора. *Звіт про ІНДЗ. НТУ*, 2023. URL: https://telegra.ph/Aerodynamics-analysis-of-solid-body-models-through-thermal-imaging-12-30

THERMOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF AERODYNAMICS OF TRANSPORT MODELS DURING THEIR CONCEPTUAL DESIGN

Kuzminets Nikolai P., Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, National Transport University, Chairman at Dept. of computer, engineering drawing and design, e-mail: kuzminecmp@ukr.net, phone +380442849713, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk street 42, office 705. https://orcid.org/0000-0002-9636-919X.

Dubovenko Yurii I., Doctor of Phylosophy in Physics and Maths, Associate Professor, National Transport University, senior teacher at Dept. of computer, engineering drawing and design, e-mail: nemishayeve@ukr.net, phone +380665979384, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk street 42, office 709. http://orcid.org/0000-0002-8128-5989

Abstract. The results of a study on the aerodynamics of solid-state transport models using thermographic diagnostics are presented. The feasibility of employing the portable thermal imager Flir One Pro combined with a smartphone is substantiated as an affordable and mobile tool for analyzing thermal fields that emerge during hot-air flow around scaled models. The methodology involves surface heating with a construction hairdryer followed by visualization of temperature distribution as thermal maps, which with certain assumptions reflect zones of increased aerodynamic drag. The objects of study included scaled models of a bus and unmanned aerial vehicles, manufactured from polystyrene and plasticine. Qualitative analysis of thermal images allowed the identification of critical frontal resistance areas linked to geometric shaping features, particularly in the nose section, wing–fuselage junctions, and protruding structural elements. Several optimization recommendations are outlined, including nose reshaping, cabin volume reduction, body contour smoothing, and modifications of engine nacelles. The findings demonstrate that even under field conditions, designers can obtain rapid visual "feedback" regarding the efficiency of conceptual solutions without wind tunnel testing. The technique is suitable for iterative improvement of transport forms in the early stages of design, when resource efficiency and development speed are crucial. The integration of thermography with computer-aided modeling suits (e.g., SolidWorks, T-Flex, Elcut) is highlighted for developing more energy-efficient and ergonomic transport concepts. The study fills a gap in literature, where systematic descriptions of thermographic methods in conceptual transport design have been lacking, and defines directions for integrating thermal imaging into industrial design practice.

Keywords: Simulation, thermography, thermal imaging, aerodynamic drag, portable thermal imager, conceptual design, UAV, bus model.

References

1. DALI thermal imagers: high quality and affordability for the consumer. *Market of measuring devices "Simvolt"*. Blog. Kyiv, 2020. URL: https://simvolt.ua/teplovizori-dali-visoka-ya-kist-i-dostupnist-dlya-spozhivacha/ [in Ukrainian].

2. Inspection of a building with a thermal imager. *LLC MSP "Prommaterial"*. Lviv, 2023. URL: http://prommaterial.com.ua/obstezhennia-budivli-teplovizorom.html [in Ukrainian].

3. Saurabh Saxena, Junhwa Hur, Charles Herrmann, Deqing Sun, David J. Fleet. Zero-Shot Metric Depth with a Field-of-View Conditioned Diffusion Model. *Computer Science*. 2023. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.13252. URL: https://diffusion-vision.github.io/dmd/

4. Lishchenko L.P. Monitoring the thermal field of the surface of former production zones and industrial facilities in Kyiv using satellite data. *Ukrainian Journal of Remote Sensing of the Earth*. 2020. No. 25. P. 17–27. DOI: 10.36023/ujrs.2020.25.172. URL: https://ujrs.org.ua-/ujrs/article/download/172/191 [in Ukrainian].

5. Thermal field analyzers. *B.I. Verkin Institute of Thermal Informatics and Thermal Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Website post. Kharkiv, 2023. URL: https://ilt.kharkiv.ua/bvi/technology/atp/atp_u.htm [in Ukrainian].

6. Kudykina T.O., Goncharenko V.O., Kuzmenko I.V. Investigation of thermal fields in microcircuits. Current problems of education and upbringing of people with special needs: Collection of scientific issues. P. 374-382. URL: https://ap.uu.edu.ua/article/594 [in Ukrainian].

7. Veselovsky V., Berlov O. Calculation of temperature fields of composite constructions. *Bulletin of*

Ternopil State Technical University. 2008. Vol. 13, No. 1. P. 161-170. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/186563362.pdf [in Ukrainian].

8. Vanieyev S.M. Computer modeling of dynamic systems. *Workshop*. Thermal analysis of seals. Sumy: SumDU, 2019. URL: https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lec-tured:5ad1-fb886b43a18f3b33894d16dcd2798afb3ed2/latest/859110/КМДС_л_6_.pdf [in Ukrainian].

9. Moskvitina A., Shishina M. Research of the temperature field within indoor area during the operation of air conditioning systems with variable thermal loads of the room. *Young Scientist*. 2020. No. 3(79). P. 186-192. DOI: https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-40. URL: https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/1464 [in Ukrainian].

10. Performing strength calculations based on preliminary thermal analysis data in Ansys Workbench Mechanical. Blog. *Soft Engineering Group*., Kyiv, 2016. URL: https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/154-vypolnenie-prochnostnogo-rascheta-na-osnove-dannykh-predvaritelnogo-teplovogo-analiza-v-ansys-workbench-mechanical.html

11. Calculation of temperature fields in the Elcut program. *Portal Haitek*. M., 2023. URL: https://haitek.ru/products/raschet_temperaturnogo_polya.php

12. Dubitsky S.D. Elcut - finite element analysis of electromagnetic and temperature fields. IsiCAD - your window into the world of CAD. *Eng. portal*. M., 2023. URL: https://isicad.ru/-ru/articles.php?article_num=22698

13. T-Flex Analysis. User's Guide: Thermal Analysis. M: Top-Systems, 2009. P. 39-40. URL: https://studfile.net/preview/5048969/page:39/

14. Sergeichuk O.V. Building Physics. Building Thermal Engineering of Building Enclosing Structures. *Lab. Practical*. Calculation of Heat Transfer Resistance Using the Therm Software. Kyiv: KNUBA, 2020. 40 p. URL: https://org2.knuba.edu.ua/pluginfile.php/106684/mod_f-older/content/0/Laboratory%20work.Calculation%20with%20therm%20program.ppsx [in Ukrainian].

15. Kondratyuk V.A. Heat transfer and aerodynamics of bundles of flat oval tubes in transverse flow. Dissertation … Ph.D. Kyiv: NTUU KPI, 2016. 1977 p. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/-123456789/15801/1/Kondratyuk_dis.pdf [in Ukrainian].

16. Makhotilo K.V., Lysenko L.I., Bulgakov O.V. Fundamentals of thermography: a textbook. Kharkiv: FOP Panov A.M., 2021. 106 p. ISBN 978-617-7947-76-8. URL: https://repositо-ry.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/e7345a4e-e63f-451e-809f-ba951c84a96e/content [in Ukrainian].

17. Dubovenko Y.I., Kuzminets M.P., Rozovenko A.I., Starusova M.Yu. Qualitative analysis of aerodynamics of solid-body models of transport using a thermal imager: Report on Pers. Res. Assign. Kyiv: NTU, 2023. URL: https://telegra.ph/Aerodynamics-analysis-of-solid-body-models-through-thermal-imaging-12-30 [in Ukrainian].

УДК 539.3
UDK 539.3

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-420-429

СКЛАДНЕ ОБЕРТАННЯ ТОНКОСТІННОГО ОДНООПОРНОГО РОТОРА НА ПРУЖНОМУ ВАЛУ
COMPLEX ROTATION OF A THIN-WALLED SINGLE SUPPORT ROTOR ON AN ELASTIC SHAFT



***Лоза Ігор Андрійович**, доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки. Київ, Україна, e-mail: lozaigor1956@gmail.com,*

https://orcid.org/0000-0002-2678-6908



***Мельник Всеволод Михайлович**, кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, кафедра теоретичної та прикладної механіки. Київ, Україна, e-mail: melnzema@gmail.com,*

https://orcid.org/0009-0005-0588-7645



***Соловйов Ігор Леонідович**, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, кафедра теоретичної та прикладної механіки. Київ, Україна, e-mail: i.soloviov@ntu.edu.ua,*

https://orcid.org/0000-0001-5203-4139



***Худолій Сергій Миколайович**, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, кафедра вищої математики. Київ, Україна, e- mail: s_hoodoliy@i.ua,*

https://orcid.org/0000-0001-6054-6708

Анотація. Ротори сучасних літальних апаратів зазвичай створюються у вигляді комбінації пружних валів, тонкостінних дисків, оболонок і тонких закручених лопаток. Особливості динамічної поведінки пружних систем, які обертаються, пов'язані з тим, що їх елементи при коливаннях одночасно беруть участь у різних видах рухів і на них діють позиційні сили інерції, що залежать від розташування елемента, та гіроскопічні сили інерції, зумовлені взаємодією обертальних і лінійних складових руху.

Умова $\omega >> \omega_0$ дозволяє шукати розв'язок в два етапи. На першому етапі ротор здійснює просте обертання навколо своєї осі симетрії з постійною по модулю кутовою швидкістю ω. На другому етапі, який зумовлений плоским примусовим поворотом осі обертання, на елементи ротора діють сили інерції, які збуджують малі прецесійні коливання оболонки відносно початкового напруженого стану.

В процесі розв'язування задачі ротор умовно розбивається на окремі складові оболонки, для кожної з яких розв'язується система лінійних диференціальних рівнянь за допомогою методу початкових параметрів, а частинні розв'язки рівнянь знаходяться методом Рунге - Кутта четвертого порядку та додатково застосовується модифікована процедура ортогоналізації. Початкові умови для кожної оболонки визначаються з граничних умов та рівнянь спряження суміжних оболонкових елементів в місцях розгалуження.

Аналіз отриманих результатів свідчить про можливість виникнення резонансних режимів періодичних рухів. Встановлено що даний ротор має два резонансні режими руху, знайдено частоти цих режимів. Показано, що в околі резонансних кутових швидкостей загальний гіроскопічний момент, що діє у випадку складного обертання з боку пружного ротора на несуче тіло, може значно відрізнятися від відповідного моменту, який знайдено для твердого тіла геометрично еквівалентного ротору.

Ключові слова: тонкостінний ротор, складне обертання, прецесійні коливання, резонанс, напружено-деформований стан, складені оболонки.

Вступ. Під час експлуатації літальних апаратів на їх ротори діють різні нестаціонарні навантаження, що зумовлені дією аеродинамічних сил, високотемпературних полів та загальною вібрацією системи. Ротори двигунів сучасних літальних апаратів зазвичай створюються у вигляді комбінації пружних валів, тонкостінних дисків, оболонок і тонких закручених лопаток. Проблеми дослідження тонкостінних пружних роторів, що здійснюють складне обертання, виникають при теоретичному моделюванні динамічних процесів, що супроводжують зліт, посадку та маневри літальних апаратів. Постановка таких задач різко ускладнюється накладенням ефектів прискорених переносних, обертальних і пружних рухів і дії навантажень, викликаних неоднорідністю силових полів. Під час складних обертань виникають недисипативні сили Коріоліса , що залежать від швидкості . Оскільки ці сили є гіроскопічними, їх потужність дорівнює нулю, але вони істотно впливають на характер руху пружної системи, виключаючи можливість її коливань з однаковими фазами. У результаті генеруються так звані прецесійні коливання, які в системі координат, що пов'язана з ротором, мають вид гармонійної хвилі, яка біжить з кутовою швидкістю обертання в протилежному напрямку [1, 2, 3].

Поставлені задачі описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних, коефіцієнти та праві частини яких залежать не лише від просторових координат, а також й від часу, тому для їх розв'язання необхідно розробити спеціальні чисельні алгоритми [1-5].

На сьогодні досліджено питання динамічної рівноваги та коливань оболонок при простому обертанні [2, 6-7]. Задачі прецесійних коливань тонких оболонок [1-4], лопатевого ротора [7-9] та одноопорного тонкостінного ротора при складному обертанні розглядаються в [3]. Дослідженню динаміки оболонок при нестаціонарному навантажені присвячені роботи [1-4, 6-7, 10].

На цей час особливості динаміки складного обертання оболонкових конструкцій залишаються практично невивченими, тому задача теоретичного моделювання складного обертання тонкостінного ротора на пружному валу з врахуванням збудження його пружних прецесійних коливань є актуальною. Знання особливостей таких коливань дозволяє уникнути появи резонансних режимів вібрацій, знизити ймовірність руйнування елементів ротора літального апарата і поліпшити динамічні характеристики двигуна.

Постановка задачі. Будемо вважати, що оболонка з розгалуженим меридіональним перерізом на пружному валу, який моделюється тонкостінною оболонкою від'ємної гаусової кривизни (рис.1) обертається з постійною по модулю кутовою швидкістю $\vec{\omega}$, відносно осі симетрії $0z$, яка, в свою чергу, здійснює примусовий плоский поворот з постійною швидкістю $\vec{\omega}_0$, за умов, що $\omega >> \omega_0$.

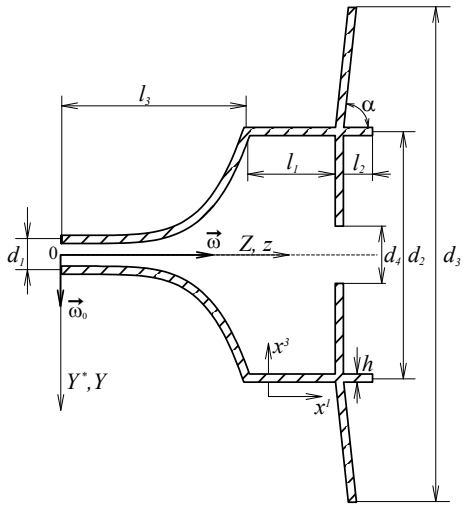


Рисунок1 – Розрахункова схема ротора.
Figure 1 – The rotor design scheme.

Для моделювання пружних коливань оболонки, що зумовлені складним обертанням, введено праві системи координат: $0X^*Y^*Z^*$ – інерційна система координат з початком у центрі лівого опорного контуру, вісь $0Y^*$ якої колінеарна вектору повороту $\vec{\omega}_0$; $0xyz$ – система координат, що зафіксована в основі та обертається; $0XYZ$ – система координат, вісь $0Y$ якої збігається з віссю $0Y^*$, а вісь $0Z$ – з віссю $0z$. На серединній поверхні оболонки введено ортогональну криволінійну систему координат $0_1x^1x^2x^3$, у якій координатна лінія x^1 лежить в твірному перерізі, x^2 спрямована в окружному напрямку, x^3 – по внутрішній нормалі до поверхні оболонки

Основна частина. Динамічна рівновага оболонкового елемента в системі координат $0xyz$ визначається рівняннями [1-4]

$$\frac{\partial\sqrt{a}\vec{T}^{\alpha}}{\partial x^{\alpha}}-\sqrt{a}h\gamma\vec{a}=0\,,\qquad \frac{\partial\sqrt{a}\vec{M}^{\alpha}}{\partial x^{\alpha}}+\left(\vec{e}_{\alpha}\times\vec{T}^{\alpha}\right)\sqrt{a}=0\qquad(\alpha=1,2),\tag{1}$$

де a – фундаментальний визначник метричного тензора;
$\vec{T}^{\alpha}$ – вектор внутрішніх сил;
$\vec{M}^{\alpha}$ – вектор внутрішніх моментів;
$\vec{a}$ – вектор абсолютного прискорення;
h – товщина оболонки;
γ – густина її матеріалу;
$\vec{e}_{\alpha}$ – вектори основного локального базису.

Вектор абсолютного прискорення $\vec{a}$ визначається за формулою

$$\vec{a}=\vec{a}_e+\vec{a}_r+\vec{a}_c\,.\tag{2}$$

Для обчислення векторів переносного $\vec{a}_e$, відносного $\vec{a}_r$ і коріолісового $\vec{a}_c$ прискорень, що входять в (2), використовуються співвідношення

$$\vec{a}_e = \vec{\varepsilon} \times \vec{\rho} + \vec{\Omega} \times \left(\vec{\Omega} \times \vec{\rho} \right), \quad \vec{a}_c = 2\vec{\Omega} \times d\vec{\rho}/dt, \qquad \vec{a}_r = d^2\vec{\rho}/dt^2, \tag{3}$$

де $\vec{\rho} = \vec{R} + \vec{u}$ – радіус - вектор точки елемента деформованої оболонки в рухомій системі координат *0xyz*;

$\vec{R}$ – радіус - вектор точки елемента недеформованої оболонки в цій системі координат;

$\vec{u}$ – вектор переміщень елемента оболонки;

$\vec{\Omega}$ – вектор абсолютної кутової швидкості системи відліку *0xyz*;

$\vec{\varepsilon}$ – вектор кутового прискорення цієї системи.

Не враховуючи величини більш високого порядку малості, вектор абсолютного прискорення в основному локальному базисі набуває вигляду

$$\begin{aligned} \vec{a} = \Big[& -\omega^2 r \sin\varphi / \sqrt{a_{11}} + 2\omega_0 \omega r \sin\left(\omega t + x^2\right) \cos\varphi / \sqrt{a_{11}} - \omega^2 u_1 \sin^2\varphi / a_{11} + \\ & + \omega^2 u_3 \sin\varphi \cos\varphi / \sqrt{a_{11}} - 2\omega \dot{u}_2 \sin\varphi / \sqrt{a_{11} a_{22}} + \ddot{u}_1 / a_{11} \Big] \cdot \vec{e}_1 + \\ & + \Big[-\omega^2 u_2 / a_{22} + 2\omega \dot{u}_1 \sin\varphi / \sqrt{a_{11} a_{22}} - 2\omega \dot{u}_3 \cos\varphi / \sqrt{a_{22}} + \ddot{u}_2 / a_{22} \Big] \cdot \vec{e}_2 + \\ & + \Big[\omega^2 r \cos\varphi + 2\omega_0 \omega r \sin\left(\omega t + x^2\right) \sin\varphi + \omega^2 u_1 \cos\varphi \sin\varphi / \sqrt{a_{11}} - \\ & - \omega^2 u_3 \cos^2\varphi + 2\omega \dot{u}_2 \cos\varphi / \sqrt{a_{22}} + \ddot{u}_3 \Big] \cdot \vec{e}_3, \end{aligned} \tag{4}$$

де φ – кут між дотичною до твірної оболонки і віссю обертання,

$r=r(x^1)$ – відстань від осі обертання до розглянутого елемента,

a_{ii} – коефіцієнти першої квадратичної форми оболонки,

u_i, $\dot{u}_i$, $\ddot{u}_i$ – компоненти вектора переміщень $\vec{u} = u_s \vec{e}^{\,s} = u_\alpha \vec{e}^{\,\alpha} + u_3 \vec{n}$ (α=1, 2) та їх похідні за часом.

Умова $\omega >> \omega_0$ дозволяє шукати розв'язок в два етапи. На першому етапі ротор здійснює просте обертання навколо своєї осі симетрії з постійною по модулю кутовою швидкістю ω. На другому етапі, який зумовлений плоским примусовим поворотом осі обертання, на елементи ротора діють сили інерції, які збуджують малі прецесійні коливання оболонки відносно початкового напруженого стану. Вигляд прискорення $\vec{a}$ дозволяє подати шукані функції у формі гармонійних хвиль, що біжать в окружному напрямку [1-4]

$$\begin{aligned} & \Delta T^{11} = T^{(11)}(x^1)\sin(\omega t + x^2), \quad \Delta T^{12} = T^{(12)}(x^1)\cos(\omega t + x^2), \quad \Delta T^{22} = T^{(22)}(x^1)\sin(\omega t + x^2), \\ & \Delta T^{13} = T^{(13)}(x^1)\sin(\omega t + x^2), \quad \Delta T^{23} = T^{(23)}(x^1)\cos(\omega t + x^2), \\ & \Delta u_1 = u_{(1)}(x^1)\sin(\omega t + x^2), \quad \Delta u_2 = u_{(2)}(x^1)\cos(\omega t + x^2), \quad \Delta u_3 = u_{(3)}(x^1)\sin(\omega t + x^2). \end{aligned} \tag{5}$$

Заміна (5) дає змогу виключити з (1) фазову координату $\omega t + x^2$, а також похідні по x^2, t та побудувати систему звичайних диференціальних рівнянь першого порядку відносно шуканих функцій з незалежною змінною x^1.

В процесі розв'язування задачі ротор умовно розбивається на окремі складові оболонки, для кожної з яких розв'язується система лінійних диференціальних рівнянь за допомогою методу початкових параметрів, а частинні розв'язки рівнянь знаходяться методом Рунге - Кутта четвертого порядку [4-5]. Початкові умови для кожної оболонки визначаються з граничних умов та рівнянь спряження суміжних оболонкових елементів в місцях розгалуження. Для ротора рівняння спряження чотирьох оболонок для складного обертання буде мати вигляд

$$u_{(1)}^{(1)}\cos\varphi_1+u_{(3)}^{(1)}\sin\varphi_1=u_{(1)}^{(2)}\cos\varphi_2+u_{(3)}^{(2)}\sin\varphi_2,\quad u_{(1)}^{(1)}\sin\varphi_1-u_{(3)}^{(1)}\cos\varphi_1=u_{(1)}^{(2)}\sin\varphi_2-u_{(3)}^{(2)}\cos\varphi_2,$$
$$u_{(1)}^{(1)}\cos\varphi_1+u_{(3)}^{(1)}\sin\varphi_1=u_{(1)}^{(3)}\cos\varphi_3+u_{(3)}^{(3)}\sin\varphi_3,\quad u_{(1)}^{(1)}\sin\varphi_1-u_{(3)}^{(1)}\cos\varphi_1=u_{(1)}^{(3)}\sin\varphi_3-u_{(3)}^{(3)}\cos\varphi_3,$$
$$u_{(1)}^{(1)}\cos\varphi_1+u_{(3)}^{(1)}\sin\varphi_1=u_{(1)}^{(4)}\cos\varphi_4+u_{(3)}^{(4)}\sin\varphi_4,\quad u_{(1)}^{(1)}\sin\varphi_1-u_{(3)}^{(1)}\cos\varphi_1=u_{(1)}^{(4)}\sin\varphi_4-u_{(3)}^{(4)}\cos\varphi_4,$$
$$u_{(2)}^{(1)}=u_{(2)}^{(2)},\quad u_{(2)}^{(1)}=u_{(2)}^{(3)},\quad u_{(2)}^{(1)}=u_{(2)}^{(4)},\quad \vartheta_{(1)}^{(1)}=\vartheta_{(1)}^{(2)},\quad \vartheta_{(1)}^{(1)}=\vartheta_{(1)}^{(3)},\quad \vartheta_{(1)}^{(1)}=\vartheta_{(1)}^{(4)},$$
$$T_{(1)}^{(11)}\cos\varphi_1+\left(T_{(1)}^{(13)}-\sqrt{a_{(1)}^{22}}M_{(1)}^{(12)}\right)\sin\varphi_1=T_{(2)}^{(11)}\cos\varphi_2+\left(T_{(2)}^{(13)}-\sqrt{a_{(2)}^{22}}M_{(2)}^{(12)}\right)\sin\varphi_2+ \tag{6}$$
$$+T_{(3)}^{(11)}\cos\varphi_3+\left(T_{(3)}^{(13)}-\sqrt{a_{(3)}^{22}}M_{(3)}^{(12)}\right)\sin\varphi_3+T_{(4)}^{(11)}\cos\varphi_4+\left(T_{(4)}^{(13)}-\sqrt{a_{(4)}^{22}}M_{(4)}^{(12)}\right)\sin\varphi_4,$$
$$T_{(1)}^{(11)}\sin\varphi_1-\left(T_{(1)}^{(13)}-\sqrt{a_{(1)}^{22}}M_{(1)}^{(12)}\right)\cos\varphi_1=T_{(2)}^{(11)}\sin\varphi_2-\left(T_{(2)}^{(13)}-\sqrt{a_{(2)}^{22}}M_{(2)}^{(12)}\right)\cos\varphi_2+$$
$$+T_{(3)}^{(11)}\sin\varphi_3-\left(T_{(3)}^{(13)}-\sqrt{a_{(3)}^{22}}M_{(3)}^{(12)}\right)\cos\varphi_3+T_{(4)}^{(11)}\sin\varphi_4-\left(T_{(4)}^{(13)}-\sqrt{a_{(4)}^{22}}M_{(4)}^{(12)}\right)\cos\varphi_4,$$
$$T_{(1)}^{(12)}=T_{(2)}^{(12)}+T_{(3)}^{(12)}+T_{(4)}^{(12)},\qquad M_{(1)}^{(11)}=M_{(2)}^{(11)}+M_{(3)}^{(11)}+M_{(4)}^{(11)},$$

де верхній індекс для $u_{(1)}^{(i)}$, $u_{(2)}^{(i)}$, $u_{(3)}^{(i)}$, $\vartheta_{(1)}^{(i)}$ та нижній індекс для сил, моментів і кутів φ_i визначає номер розглянутої оболонки.

Особливість застосування викладеного вище підходу полягає в тому, що в зв'язку з наявністю у лінеаризованій системі рівнянь великих коефіцієнтів, що обумовлені обертанням оболонки, вона є жорсткою, а серед її частинних розв'язків є швидко зростаючі функції. Тому при побудові розв'язку додатково застосовується модифікована процедура ортогоналізації [1-5].

Аналіз результатів обчислень. На основі викладеної методики проведене чисельне моделювання прецесійних коливань одноопорного ротора. В розрахунках вважалося, що d_1=0,05м, d_2=0,4м, d_3=0,8м, d_4=0,02м, l_1=0,15м, l_2=0,05м, l_3=0,1м, α=84°. Товщина кожного з оболонкових елементів ротора h=0,005м, коефіцієнт Пуассона матеріалу ν=0,3, модуль пружності $E=2{,}1\cdot10^{11}$ Па, густина $\gamma=7{,}8\cdot10^3$ кг/м^3. Значення ω змінювались в межах $0\le\omega\le 2500$ c^{-1} із кроком $\Delta\omega$=25 c^{-1}, ω_0 =1 c^{-1}.

Рівняння серединної поверхні пружного валу, диска та конуса в параметричній формі мають вигляд:

$$x=f(x^1)\cos x^2,\ y=f(x^1)\sin x^2,\ z=x^1,\ f(x^1)=\frac{d_2-d_1}{2l_3^{\,5}}\cdot(x^1)^5+\frac{d_1}{2}, \tag{7}$$

$$x=\left(\frac{d_2}{2}-x^1\right)\cos x^2,\ y=\left(\frac{d_2}{2}-x^1\right)\sin x^2,\ z=0, \tag{8}$$

$$x=\left(\frac{d_2}{2}+tg\alpha\cdot x^1\right)\cos x^2,\ y=\left(\frac{d_2}{2}+tg\alpha\cdot x^1\right)\sin x^2,\ z=x^1, \tag{9}$$

де α – кут між твірною конічної оболонки та віссю симетрії. Для циліндричної оболонки α=0.

Як відомо, інтегральною мірою динамічної поведінки механічної системи у випадку складного обертанні є її гіроскопічний момент $\vec{M}_g$. Проява цього моменту для осесиметричного твердого тіла, яке обертається і вісь якого здійснює додатковий примусовий плоский поворот, пов'язана з виникненням в опорах тіла реакцій, що складають пари сил з моментом

$$\vec{M}_g = I_z \vec{\omega} \times \vec{\omega}_0 . \quad (10)$$

Тут I_z – момент інерції тіла відносно осі обертання.

Породжені складним обертанням прецесійні коливання пружного ротора, супроводжуються виникненням в області його приєднання до твердого носія, який обертається, системи крайових пружних згинаючих та крутильних моментів і системи внутрішніх поздовжніх та перерізуючих зусиль, пружний результуючий момент $\vec{M}_e$ яких можна подати у вигляді моменту пари з модулем

$$M_e = -T_{(13)} \pi d_1^2 / 4 \sin\varphi - T_{(11)} \pi d_1^2 / 4 \cos\varphi + M_{(11)} \pi d_1 / 2 , \quad (11)$$

де $T_{(13)}$, $T_{(11)}$, $M_{(11)}$ – фізичні компоненти амплітудних значень відповідних величин у місці жорсткого з'єднання торцевої конічної оболонки з твердим носієм,

φ – кут між дотичною до твірної цієї оболонки і віссю симетрії в місцях защемлення.

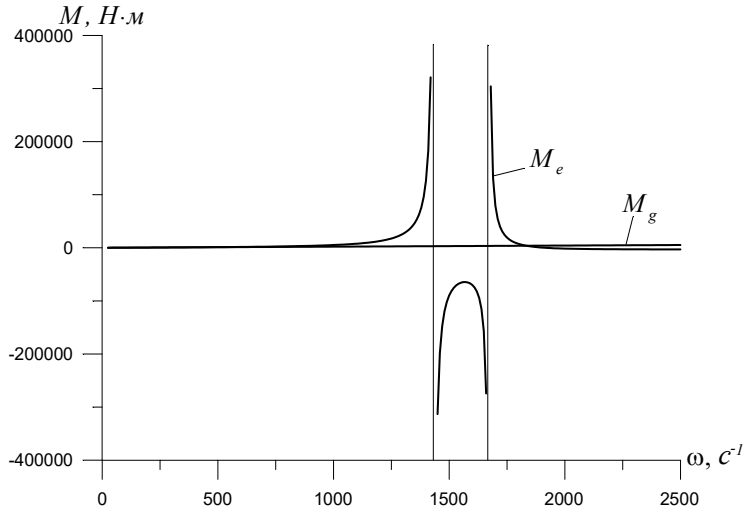


Рисунок 2 – Залежності гіроскопічного (M_g) та пружного (M_e) моментів від кутової швидкості ω.

Figure 2 – Dependencies of the gyroscopic (M_g) and elastic (M_e) moments on angular velocity ω.

На рис. 2 зображено залежність цих моментів від кутової швидкості власного обертання ω. Пружний момент M_e збігається з гіроскопічним M_g за умови невеликих значень кутової швидкості власного обертання ω ($0<\omega<1000 c^{-1}$), коли сили інерції пружних коливань малі. Досягнутий збіг гіроскопічного та пружного моментів є необхідною умовою достовірності математичної моделі та правильності роботи обчислювальної системи. На розглянутому інтервалі зміни кутової швидкості власного обертання даний ротор має два резонансні режими руху при $\omega_1 \approx 1425$ с$^{-1}$ та $\omega_2 \approx 1675$ с$^{-1}$, у яких M_e має розрив.

На рис. 3 показані форми прецесійних коливань ротора у перерізі площиною *Y0Z* при різних значеннях кутової швидкості власного обертання. Слід зазначити той факт, що в цій площині пружні переміщення u_1 і u_3 елементів гіроскопічної системи набувають максимальних значень, а u_2 дорівнює нулю. У перерізі ротора площиною *X0Z* пружні переміщення u_1 і u_3 його елементів дорівнюють нулю, а u_2 приймає максимальне значення. З цих малюнків видно, що при переході через першу резонансну частоту фаза коливань ротора змінюється на протилежну, а при переході через другу змінюється сама форма коливань.

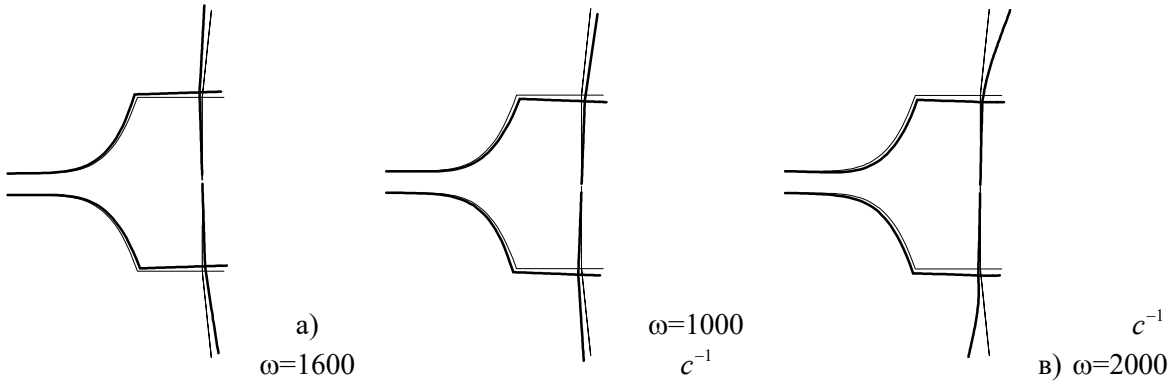
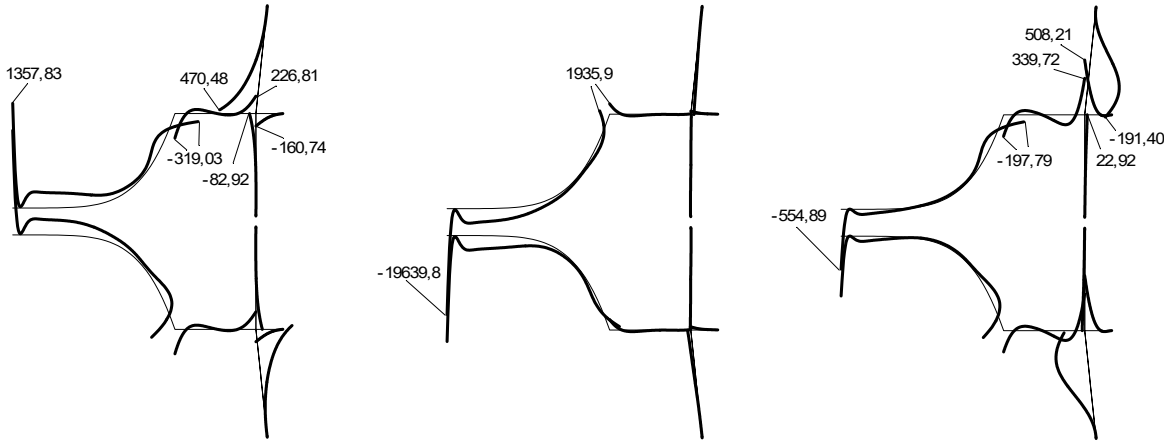


Рисунок 3 – Форми прецесійних коливань ротора при різних значеннях кутової швидкості ω.
Figure 3 – Modes of the precessional rotor vibrations at different values of the angular velocity ω.

Епюри додаткових згинальних моментів в елементах ротора в перерізі площиною, що містить вектори $\vec{\omega}$ і $\vec{\omega}_0$ при різних значеннях ω зображені на рис.4. Можна відзначити, що максимальне значення $M_{(11)}$ приймає в місцях жорсткого приєднання ротора до твердого носія, що обертається. Зіставляючи ці малюнки, звернемо увагу на те, що при переході через резонансні частоти сильно видозмінюється форма епюр $M_{(11)}$. Це ще раз наголошує на складності явища прецесійних коливань.



а) ω=1000 c^{-1} б) ω=1600 c^{-1} в) ω=2000 c^{-1}

Рисунок 4 – Епюри додаткових згинальних моментів при різних значеннях кутової швидкості ω.
Figure 4 – Distribution of additional internal bending moments at different values of angular velocity ω.

На рис. 5 показані епюри напружень, що виникають в елементах ротора від простого обертання при ω=1000 c^{-1} . Зі збільшенням ω їх значення зростає пропорційно ω^2 . Зовсім інакше поводяться додаткові напруження, що характеризують примусовий поворот осі симетрії ротора. Епюри цих функцій за $x^2 = \pi/2$ представлені на рис. 6. Звернемо увагу на те, що амплітудні значення додаткових напружень сильно змінюють свою форму при переході через резонансні частоти і перевершують напруження від простого обертання в місцях приєднання до твердого носія, що обертається.

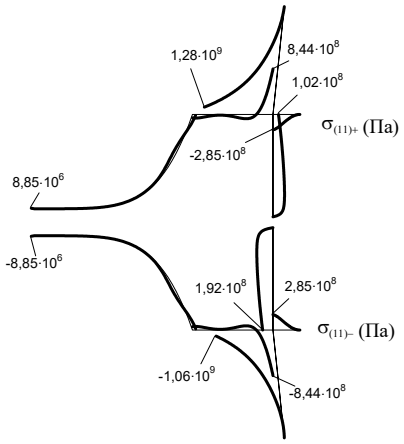
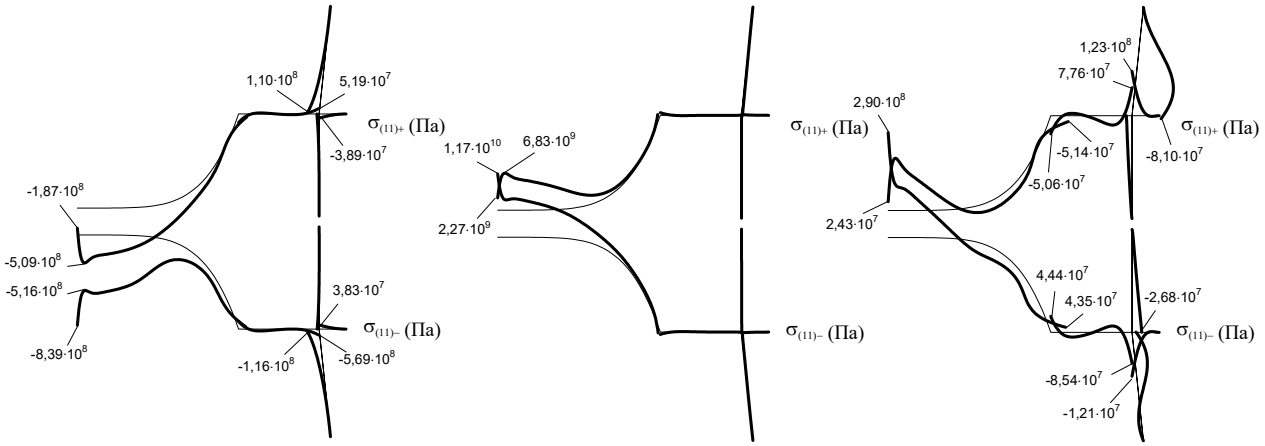


Рисунок 5 – Епюри напружень від простого обертання при ω=1000 c^{-1} .
Figure 5 – Distribution of stresses caused by simple rotation at the value of the angular velocity ω=1000 s^{-1}.



а) ω=1000 c^{-1} б) ω=1600 c^{-1} в) ω=2000 c^{-1}

Рисунок 6 – Епюри додаткових напружень при різних значеннях кутової швидкості ω.
Figure 6 – Distribution of additional internal stresses caused by complex rotation at different values of angular velocity ω.

Висновки. Аналіз отриманих результатів свідчить про можливість виникнення резонансних режимів періодичних рухів. Показано, що в околі резонансних кутових швидкостей загальний гіроскопічний момент, що діє у випадку складного обертання з боку пружного ротора на несуче тіло, може значно відрізнятися від відповідного моменту, який знайдено для твердого тіла геометрично еквівалентного ротору.

Перелік посилань

1. Solov'ev I.L. Rotation of rigid and elastic cylindrical shells elastically coupled with a platform // International Applied Mechanics. – 2006. – 42(7). – P. 818-824.

2. Gulyayev V.I., Solovjov I.L., Belova M.A. Critical states of thin ellipsoidal shells in simple and compound rotations // J. Sound and Vibrat. – 2004. – 270. – P. 323-339.

3. Gulyaev V.I., Lugovoj P.Z., Solov'ev I.L. Elastic vibrations of thin-wall one-support rotor (compound shell) under composite rotation // International Applied Mechanics. – 2003. – 39(8). – P. 969–975.

4. Gulyaev V.I., Lugovyy P.Z., Solovjov I.L. Analysis of precession vibrations of thin-wall elastic shells in compound rotation // Journal of Sound and Vibration. – 2001. – 246(3). – P. 491-504.

5. Grigorenko A. Ya., Müller W. H., Loza I. A. Selected Problems in the Elastodynamics of Piezoceramic Bodies. – Springer Nature Switzerland, 2021. – 227 p.

6. Chai Q., Wang Y. Q. A. A general approach for free vibration analysis of spinning joined conical-cylindrical shells with arbitrary boundary conditions. // Thin-Walled Structures. – 2021. – 168. – Article number 108243.

7. Zhao T.Y., Yan K., Li, H.W., Wang X. Study on theoretical modeling and vibration performance of an assembled cylindrical shell-plate structure with whirl motion. // Applied Mathematical Modelling. – 2022. – 110. P. – 618-632.

8. Gulyaev V.I., Solov'ev I.L., Khudolii S.N. Precession vibrations of the two-blade rotor with the elastic weightless shaft in compound rotation // Strength of Materials. – 2002. – 34(2). – P. 158–164.

9. Gulyaev V.I., Khudolii S.N. Vibrations of curved and twisted blades during complex rotation // International Applied Mechanics. – 2005. – 41(4). – P. 449–454.

10.Meish V.F., Galagan O.G., Mel'nik V.M. Nonaxisymmetric vibrations of conical shells of variable thickness under a nonstationary load // International Applied Mechanics. – 2014. – 50(3). – P. 295-302.

COMPLEX ROTATION OF A THIN-WALLED SINGLE SUPPORT ROTOR ON AN ELASTIC SHAFT

Loza Igor A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, National Transport University, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, tel. +38(044) 286-38-89, Ukraine, 01103, Kyiv, Boichuk str., 42, e-mail: lozaigor1956@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2678-6908

Mel'nik Vsevolod M., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, National Transport University, assistant professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Kyiv, Ukraine, tel. +38(044) 286-38-89, Ukraine, 01103, Kyiv, Boichuk str., 42, e-mail: melnzema@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-0588-7645

Solov'ev Igor L., Ph.D., associate Professor, National Transport University, assistant professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Kyiv, Ukraine, tel. +38(044) 286-38-89, Ukraine, 01103, Kyiv, Boichuk str., 42, e-mail: i.soloviov@ntu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0001-5203-4139

Khudoliy Serhiy M., Ph.D., associate Professor, National Transport University, assistant professor of the Department of Higher Mathematics, Kyiv, Ukraine, tel. +38(044) 280-71-09, Ukraine, 01103, Kyiv, Boichuk str., 42, e-mail: s_hoodoliy@i.ua, https://orcid.org/0000-0001-6054-6708

Abstract. The rotors of modern aircraft are usually created through a combination of elastic shafts, thin-walled disks, shells and thin twisted blades. Features of the dynamic behavior of elastic rotating systems are associated with the fact that their elements, when oscillating, simultaneously participate in various types of movements and are affected by positional inertia forces, depending on the location of the element, and gyroscopic inertia forces, caused by the interaction of rotational and linear components of motion.

The assumption $\omega >> \omega_0$ allows us to search for a solution in two stages. At the first stage, the rotor performs a simple rotation around its axis of symmetry with a constant angular velocity in absolute value. At the second stage, caused by a flat forced slewing of the axis of rotation, inertial forces act on the rotor elements, exciting small precessional vibrations of the shell relative to the initial stressed state.

In the process of solving the problem, the rotor is conditionally divided into individual components of the shell. For each part a system of linear differential equations is solved using the method of initial parameters, and partial solutions of the equations are found by the fourth order Runge–Kutta method, a modified orthogonalization procedure is additionally applied. The initial conditions for each shell are determined by the boundary conditions and equations of conjugation of adjacent shell elements at the branching points.

Analysis of the results obtained indicates the possibility of the emergence of resonant modes of periodic movements. It has been established that this rotor has two resonant modes of motion, and the frequencies of

these modes have been found. It is shown that in the vicinity of resonant angular velocities, the total gyroscopic moment acting in the case of complex rotation from the elastic rotor on the supporting body can differ significantly from the corresponding moment found for a rigid body geometrically equivalent to the rotor.

Key words: thin-walled rotor, complex rotation, precession vibrations, resonance, stress-deformed state, compound shells.

References

1. *Solov'ev I.L.* (2006). Rotation of rigid and elastic cylindrical shells elastically coupled with a platform. – International Applied Mechanics, 42(7), 818-824 [in English].

2. *Gulyayev V.I., Solovjov I.L., Belova M.A.* (2004). Critical states of thin ellipsoidal shells in simple and compound rotations. – J. Sound and Vibrat., 270, 323-339 [in English].

3. *Gulyaev V.I., Lugovoj P.Z., Solov'ev I.L.* (2003). Elastic vibrations of thin-wall one-support rotor (compound shell) under composite rotation. – International Applied Mechanics, 39(8), 969–975 [in English].

4. *Gulyaev V.I., Lugovyy P.Z., Solovjov I.L.* (2001). Analysis of precession vibrations of thin-wall elastic shells in compound rotation. – Journal of Sound and Vibration, 246(3), 491-504 [in English].

5. *Grigorenko A. Ya., Müller W. H., Loza I. A.* (2021). Selected Problems in the Elastodynamics of Piezoceramic Bodies. – Springer Nature Switzerland, 227 p. [in English].

6. *Chai Q., Wang Y. Q.* A. (2021). A general approach for free vibration analysis of spinning joined conical-cylindrical shells with arbitrary boundary conditions. – Thin-Walled Structures, 168, Article number 108243. [in English].

7. *Zhao T.Y., Yan K., Li, H.W., Wang X.* (2022). Study on theoretical modeling and vibration performance of an assembled cylindrical shell-plate structure with whirl motion. – Applied Mathematical Modelling, 110, 618-632 [in English].

8. *Gulyaev V.I., Solov'ev I.L., Khudolii S.N.* (2002). Precession vibrations of the two-blade rotor with the elastic weightless shaft in compound rotation. – Strength of Materials, 34(2), 158–164 [in English].

9. *Gulyaev V.I., Khudolii S.N.* (2005). Vibrations of curved and twisted blades during complex rotation. – International Applied Mechanics, 41(4), 449–454 [in English].

10.*Meish V.F., Galagan O.G., Mel'nik V.M.* (2014). Nonaxisymmetric vibrations of conical shells of variable thickness under a nonstationary load. – International Applied Mechanics, 50(3), 295-302 [in English].

UDC 330.341:658
УДК 330.341:658
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-430-447

INTELLECTUALIZATION OF HUMAN RESOURCES POTENTIAL OF TRANSPORT INDUSTRY ENTERPRISES IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЛЮДСЬКИХ РЕСУРСІВ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ



***Spitsyna* Angelina Ye.,** *Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Economics, National Transport University, angel7a@ukr.net, tel +380679053181, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovicha-Pavlenko St.,1*

https://orcid.org/0000-0001-9730-6249



Golova* Inna *G., *graduate student of the Department of conomics, National Transport University, Kyiv, Ukraine, inna.golova@gmail.com, tel. +380677786658, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovich-Pavlenko, 1*

https://orcid.org/ 0000-0001-9717-7109



Nesterenko* Oleksandr *O., *graduate student of the Department of Economics, National Transport University, Nesterenko1212@gmail.com, tel.* +380632017418. *Ukraine, 01010, m. Kyiv, St. M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1*

https://orcid.org/0009-0003-4686-877X

Abstract. The article examines the development of intellectual potential in the context of digital transformation of business entities and highlights the evolution of approaches to human resource management, demonstrating the transition from a mechanistic perception of employees to the integration of human capital concepts and strategic HR management. The study finds that the intellectualization of labor acts as a catalyst for the development processes of socio-economic systems at various levels. This process is based on the activation of intellectual labor of human resources and its optimal utilization, ensuring the penetration of the results of such intellectualization into various spheres of life and economic activities of enterprises in the transport sector. It is determined that the strategic resource for the formation of intellectual capital is human resources, which are shaped in the conditions of digital transformation of business entities and serve as a source of innovation in a transport enterprise.

Digitalization continuously affects all sectors of the economy, including the transport sector, which, in accordance with global demands, is forced to restructure its activities (due to military actions, pandemics). The article states that the development of digital systems is necessary for transport in order to make the sector more

convenient for people and for business development. Human resources generate a competitive advantage for a business entity, which is considered a specific factor distinguishing one enterprise from another.

The conclusions of the study emphasize that successful management of human resource potential in today's dynamic and complex business environment requires a comprehensive approach that takes into account both traditional aspects and modern challenges. A deep understanding and effective management of human resources are crucial for ensuring competitiveness, innovative development, and sustainable success of transport enterprises.

Keywords: intellectualization, potential, human resources, evolution, development, management, enterprises, transport, sector, digitalization, conceptual approaches

Introduction. Problem Statement and Relevance of the Chosen Topic

Transport is an important part of the global economy and a social institution of modern society, meeting the population's needs for transportation. It has become an integral part of people's lives, influencing their reality and permeating virtually all types of human activity.

In today's conditions, the role of intellectual human resources has grown significantly. They determine not only the quality of produced goods and services but also the structure of the national economy, the efficiency of enterprise operations, and their innovative potential.

The transition to a digital economy is significantly changing approaches to managing transport industry enterprises, particularly in the field of human resource management. Constant changes in the market and across industries require a flexible organizational environment capable of continuously adapting to modernization. In a competitive reality, Human Resources Management (HRM) plays an important role, as new forms of business demand new ways of working with human resources.

The quality of personnel management in the transport sector is a key factor in enterprise success. HR specialists must analyze and adapt to modern social, economic, political-legal, technological, and environmental conditions. To meet current challenges, most HR professionals must abandon outdated habits and ways of thinking, helping enterprises identify modern strategies and develop programs for human capital development.

The pressing issue is not simply the management of transport but the management of transport systems using intelligent technologies. The foundation for creating competitive advantages lies not merely in labor based on IT technologies, but above all in innovative labor by personnel, intellectual development, and mobility. This primarily involves new means of creating, distributing, exchanging, and consuming goods and services, opening modern opportunities to improve the efficiency and competitiveness of enterprises.

At the center of these changes are human resources — the main resource of any enterprise. The success of transport enterprises in the digital economy depends on their skills, competencies, intellect, and readiness to adapt to digital transformations. Human resource development is becoming a key factor determining the ability of enterprises to implement new innovative technologies, optimize creative business processes, and remain competitive in the digital world.

Analysis of Recent Research and Publications

The problem of intellectualizing enterprise activities cannot be solved without a priority focus on increasing the share of intellectual work in personnel activities, which, in turn, requires a systematic approach.

Given the complex security, economic, and political situation in Ukraine, intelligent management systems can become a powerful tool for stabilizing and ensuring the sustainable development of enterprises, especially under conditions of limited access to resources and constant changes in external factors. At the same time, the great diversity of intelligent systems and their technological foundations necessitates their classification to facilitate the selection of the most optimal solutions for enterprises. The further rational use of implemented intelligent management systems enables enterprises to enhance adaptability, flexibility, and resilience to external influences, which underscores the relevance of this research topic.

Theoretical aspects of the intellectualization of the economy and enterprises have been studied by many foreign scholars, including D. Bell, E. Brooking, P. Drucker, B. Sántho, and others. In Ukraine, this issue has

been examined by O. B. Butnik-Siverskyi, O. Bohutska, N. Briukhovetska, V. Heyets, M. Yu. Hryhorak, N. Huk, N. Kelchevska, E. M. Libanova, A. Merzlyak, M. Polyakov, Y. Sytnyk, Ye. Fomina, and others.

Studies of the current state and prospects of digital transformation in Ukraine have been conducted by scholars such as A. Kolot, O. Herasymenko, O. S. Irtyshchev, A. V. Harahulia, and R. V. Stavtsov. The expediency of applying digital technologies in Ukrainian HR management practices, especially under martial law, has been substantiated by Kh. Makhmudov and V. Chukhlib. I. Koloberdyanko and N. Metelska have examined modern approaches to personnel management to mitigate the negative effects of socio-economic changes. Certain issues related to the impact of digital technologies on modern HR practices and the influence of digitalization on HR have been addressed by I. Dluhopolskaya, Yu. Huk, V. E. Melnychuk, and K. O. Boyarinova, as well as in analytical reports by Deloitte, the European Commission, and the World Economic Forum.

The purpose of this article is to examine the role of intellectualizing human resource potential in ensuring the successful operation of transport industry enterprises in the context of a digitalized economy, to identify the main challenges and opportunities faced by enterprises, and to develop effective ways for organizations to adapt to the changing challenges of the environment.

Presentation of the main research material and obtained results

In the context of modern society's development, transport performs important functions in all areas of social life. It increases the efficiency of public production, creates conditions for the rational placement of productive forces across the country's territory—taking into account the specifics of enterprise locations, sources of raw materials, and consumers—promotes the development of international relations, trade, tourism, agriculture, and addresses social issues related to professional, educational, cultural, leisure, and other activities.Thus, transport is an important social system of society and occupies a significant place in the socio-territorial and spatial organization of people.

Transport is a set of means and systems used for moving people, cargo, and other material resources in geographical space. It is a necessary and objectively existing social institution that has become an integral part of people's lives under modern conditions. It is deeply embedded in people's everyday reality, in its systems and structures. As a social institution, transport determines the spatial mobility of individuals and social groups, contributes to the development of social ties, relationships, and interactions, exchange of cultural experiences and achievements, and integration processes in society [19].

Analyzing the essence of the concept of transport, O. Dubinsky defines it in both narrow and broad senses. In the narrow sense, transport is defined, in accordance with current legislation, as a means intended for the movement of people, cargo, resources, information, electronic signals, etc. In the broad sense, it is an integral and strategically important intersectoral area of the national economy, aimed at meeting state, social, personal, public, industrial-production, or other needs for transportation and movement [3]. Under modern conditions, transport is one of the most important branches of the economy and a social institution that performs important functions and meets the needs of people, society, and all forms of social production in transportation.

The modern transport industry faces a number of large-scale challenges, most of which cannot be solved in the short term. In particular, there is an urgent need to strengthen state regulation of transportation processes, as companies often fail to adapt quickly to dynamic changes in the competitive environment.

The issue is not merely transport management, but managing transport systems using intelligent technologies, in which communication, control, and monitoring tools are initially embedded in vehicles and transport infrastructure facilities, and decision-making capabilities are available to all transport users. The intellectualization of management processes requires additional research in such areas as: developing optimized knowledge base structures; improving systems for collecting current information and remotely transmitting signals and data [9].

An Intelligent Transport System (ITS) is the systematic integration of modern information and communication technologies and automation tools with transport infrastructure, vehicles, and users, aimed at increasing transport process safety and efficiency, as well as driver and passenger comfort. Examples of

intelligent systems for vehicles include: collision avoidance systems, collision notification systems, and driver assistance systems.

The development of an ITS can be grouped into priority areas:

- Optimal use of road and traffic information, ensuring the receipt of up-to-date and verified information at all levels of transport management, regardless of the operator's ownership form or type of transport, and ensuring its availability to all users.

- Facilitating barrier-free cargo movement and optimal freight management in international transport corridors and urban agglomerations through automatic vehicle identification, the provision of various services (e.g., customs) online, and spatial positioning based on satellite navigation systems.

- Increasing road safety by developing automatic systems that warn of and prevent dangerous situations between vehicles and between vehicles and pedestrians.

- Ensuring data security in ITS, including personal and financial user data.

- Integrating the vehicle into the transport infrastructure through the use of open "applications" in onboard computer systems and ITS software, enabling compatibility of information systems and the automatic transfer of data necessary for optimal control of both individual vehicles and traffic flows [9].

In developed countries, intelligent transport systems and their components have already proven their effectiveness and relevance. The global practice of ITS implementation is perceived as a general transport ideology for integrating telematics achievements into all types of transport activities to solve economic and social problems: reducing accidents, increasing freight transport efficiency, ensuring transport safety, improving environmental performance, etc.

The transport sector is undergoing a large-scale digital transformation caused by rapid technological progress and changing consumer behavior. This determines the future development of transport and creates new opportunities for industry modernization [32].

The modernization shifts in the global economy, moving it toward an innovative development path while making it more socially oriented, are important strategic priorities of socio-economic development. The success of solving these tasks directly depends on forming a new-quality human potential that meets modern requirements. Thus, in recent decades, issues of quality of life, human development, and the development of human potential have become important vectors of scientific research.

An inherent phenomenon and process of modern economic and social development is intellectualization, defined in dictionaries as increasing or strengthening the spiritual, mental, and intellectual foundations of something [22], or as the growth in the share of mental functions (management, control, adjustment) in the structure of a worker's labor efforts based on scientific and technological progress [27]. Linking intellectualization to various changes in an enterprise's activities, it should be noted that its main generator and implementer is a person with their inherent level of intellectual development. Therefore, the problem of enterprise intellectualization cannot be solved without prioritizing the growth of the intellectual component in staff activities, which in turn requires a systematic approach.

The accelerated intellectualization of economic activity has become a hallmark of global social progress at the turn of the century. Of course, knowledge has always been used in economic activity, but the 20th century demonstrated how quickly new ideas are developed, information is processed, and new knowledge is applied in production, work, and daily human life. Despite a number of crisis phenomena in the global economy, the importance of education, science, applied research, innovations, and high-tech industries for sustainable development and improved quality of life has not diminished.

There is no doubt about the importance of developing the intellectual component of social development. Knowledge and accumulated ideas have always been regarded by progressive economies as the basis for development and a necessary condition for leadership. The development of this intellectual component is impossible without proper attention to human potential [23].

Intellectual potential is the set of a person's abilities and capabilities for creative activity, accumulation and use of knowledge, ideas, and results of intellectual work for the purpose of social development. It includes the ability to learn, solve problems, think critically, and creatively address challenges. Components of human resources' intellectual potential include:

- Cognitive abilities (memory, attention, thinking, imagination, perception);
- Knowledge and skills (scope and depth of knowledge, ability to apply it);
- Creativity (ability to generate new ideas, find non-standard solutions);
- Learning (ability to learn throughout life);
- Critical thinking (ability to analyze information, evaluate arguments, and draw reasoned conclusions);
- Emotional intelligence (ability to understand and manage one's own emotions and those of others).

The development of intellectual potential is a key factor for personal growth and successful self-realization. Today, the problem of forming, assessing, and rationally using the intellectual potential of Ukrainian transport enterprises is one of the most important for Ukraine [25].

In official printed publications, there are different interpretations of the term "intellectual potential," which has been the subject of scientific research by many domestic and foreign scholars.

The concept of "intellectual potential" as an economic category has been addressed in a number of scientific works and studies, the analysis of which is presented in Table 1.

In our view, these definitions do not fully and clearly reflect the essence, structure, and modern characteristics of an enterprise's intellectual potential. They mainly emphasize that human resources should accumulate and apply knowledge for the successful operation of the enterprise.

Thus, it can be argued that, in a broad sense, the intellectual potential of an enterprise (individual, or society) is the totality of a wide range of intellectual abilities and intellectual resources utilized by a given system to achieve the goals of self-preservation and development. In a narrower sense, the intellectual potential of an enterprise is often compared to the intellectual potential of society (factors related to its reproduction) or to intellectual capital, namely its structural or managerial component, which includes organizational, economic, and managerial experience, knowledge, skills, abilities, qualifications, intellectual capital, corporate culture, ethics, creative thinking, and so forth.

At the scale of the national economy, intellectual potential possesses significant reserves of economic activity and serves as a key vector for the development of innovations in a modern information society. It is the only factor whose development has virtually unlimited resources—both in qualitative and quantitative terms, as well as in time parameters [5].

According to the scholar Melnyk L.H., intellectual potential facilitates the creation of new material and spiritual assets thanks to the accumulated knowledge, experience, and high qualifications of enterprise employees [17].

Dyba V. defines the concept of "intellectual potential" as the ability to accumulate, generate, and apply new knowledge, ideas, projects, behavioral models, and scientific and technical information, which will become the intellectual property of Ukraine and will actively contribute to its development and integration [31].

"Intellectual potential of an enterprise" is an economic category composed of science, education, innovation, technologies, ideas, and all types of intellectual activities, and is capable of creating, applying, implementing, and developing innovative products and technologies by transforming knowledge, skills, projects, and accumulated experience [5].

Some researchers [2] closely associate the term "intellectual potential" with the term "intellectual capital." Accordingly, intellectual potential serves as the basis for calculating the volume and efficiency of the use of intellectual capital, which is successfully implemented in production and economic activities to generate income.

It is considered that the transformation from intellectual potential to the intellectual capital of an enterprise implies a transition from expenditures on the formation of human capital to profits from its utilization by transferring the value of accumulated knowledge, capabilities, and practical skills into the final result achieved by enterprise employees (Fig. 1).

Table 1 – Generalized presentation of authors' scientific views on the interpretation of the term "intellectual potential"

Таблиця 1 – Узагальнене подання наукових поглядів авторів щодо трактування терміну «інтелектуальний потенціал»

Author(s)	Definition
Vovkanych S.I.	The intellectual potential of an enterprise is the ability to accumulate and apply new knowledge, information, skills, ideas, and projects that may become the intellectual
Lavrentiev V.A., Sharina A.V.	Intellectual potential is a combination of employees' individual characteristics, their theoretical knowledge, and practical experience, which they use to create innovations at various industrial and commercial enterprises.
Moisenko I.P.	Intellectual potential refers to capabilities that may be revealed—or often remain unrevealed—but that truly exist for performing specific actions.
Reka H.V.	The intellectual potential of an enterprise is the set of human abilities and capabilities in general, independent of their application in any particular production process.
Kendiukhov O.V.	Intellectual potential represents present and future capabilities that are used to achieve specific objectives.
Pererva P.H., Hliznutsa M.Yu.	The intellectual potential of an enterprise is a system of knowledge that shapes an innovative economy and a new highly developed society, ensuring socio-economic development.
Petrenko V.P.	The forecasted integral ability of an individual or a group of individuals (enterprise personnel, population of a territorial community, region, country, nation, or humanity) to create new spiritual and material values.
Sytnyk I.S.	Intellectual potential is the latent knowledge and skills of an economic system for carrying out intellectual, organizational, technical, scientific, and social activities, which can be realized as intellectual capital on a market basis.
Dyba L.M.	A subsystem of the overall creative potential of employees—an organic unity of individual intellectual abilities for reproducing accumulated knowledge and applying it, as well as the realized and unrealized creative capabilities of individual intellects.

It should be noted that the definition of "intellectual capital" is based on the concept of "human capital." It is closely related to such categories as: "intellectual labor," "intellectual resources," "intellectual assets," and "intellectual property." Human capital is the foundation for the formation of intellectual capital [1].

Human capital can be studied as a specific competence, knowledge, professional abilities, and skills of managerial staff, through whose activities both assets and income are formed. Recently, enterprises have paid significant attention to it. A distinctive feature of human capital is that over time its value does not decrease, as happens with physical capital, but on the contrary — it increases. This is due to the continuous accumulation by employees of production experience, knowledge, abilities, and acquisition of new labor skills, etc. [1].

A meaningful definition of a company's intellectual potential, in our view, is offered by Y. S. Sytnyk: "Intellectual potential of an enterprise is the latent relative abilities, strengths, and knowledge of individuals and the socio-economic system for carrying out organizational-managerial, economic, technological, informational-exchange, scientific-innovative, socio-cultural, and other intellectual-productive activities,

which can be realized in the form of the company's intellectual capital on market and individual-motivational bases" [23].

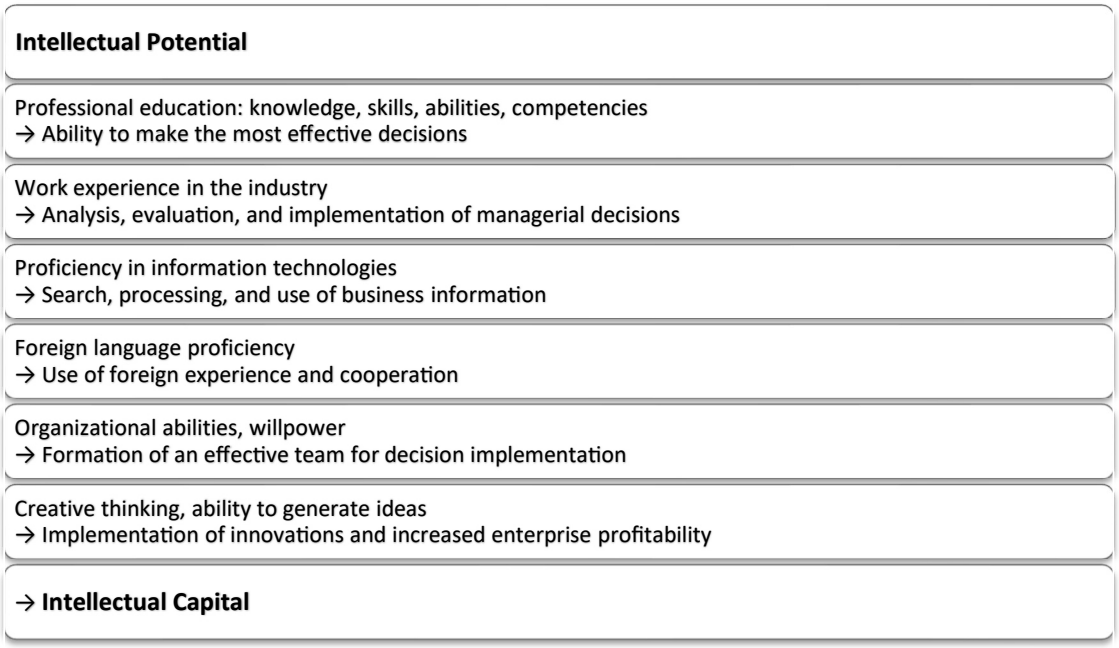


Figure 1 – Transformation of intellectual potential into the intellectual capital of the enterprise
Рисунок 1 – Трансформація інтелектуального потенціалу в інтелектуальний капітал підприємства

In modern conditions of structural economic transformation and the creation of new socio-economic institutions, the significance of human potential has undergone significant changes. The development of human potential is now the main indicator of the formation of the intellectual potential of society. At the same time, the transformational changes taking place in the economy and social life, along with their positive consequences, have led to a number of problems, most notably in the social sphere.

In the field of human potential development, the most important thing for a person is the opportunity to live a long and healthy life, acquire knowledge (education), and have the material resources to ensure a decent standard of living. At the same time, the standard of living, education, and health are not only the main parameters characterizing the level of human potential development but also the most important factors contributing to the formation of the intellectual potential of society [8].

Within the shift of paradigms in economic sciences, the idea is gaining ground that the main resource of any society is its human potential, and the main criterion of socio-economic progress is the effective use of intellectual capabilities for the development of society. The development of human potential under modern conditions becomes a priority strategic task for societal development. The level of human development determines the level of a country's development. Therefore, the issue of forming, preserving, and developing human potential is one of the most important priorities of the state's socio-economic policy and involves the development of programs to manage the process of forming a person as a professional and civic individual, as well as developing and realizing their potential.

At the same time, under conditions of decentralization of the economic, political, and social life of society, the consideration of aspects of improving the process of managing human development and determining its impact on the intellectual potential of society is becoming increasingly relevant.

Human resources are special and the most important among all types of enterprise resources; they are

the most complex object of management within an organization and, unlike material factors of production, are living, capable of making decisions, acting, and critically evaluating the requirements addressed to them, and they have subjective interests, etc. [15].

A generalized presentation of the authors' scientific views on the interpretation of the term "human resources" is given in Table 2.

Table 2 – Generalized presentation of authors' scientific views on the interpretation of the term "human resources"

Таблиця 2 – Узагальнене подання наукових поглядів авторів щодо трактування терміну «людські ресурси»

Authors	**Definition of the Concept**
Brych V., Borysiak O., Bilous L., Halysh N.	Human resources are the totality of actual and potential knowledge, skills, and abilities of employees, their physical capacity for work, and their emotional and psychological state. Through the direct interaction of such resources with other resources, new (corporate) knowledge is formed, which serves as a source for creating a unique corporate product
Levytska O. O.	Human resources are the totality of quantitative and qualitative parameters (including human potential, health status, education level, abilities and culture, professional knowledge, motivation, and other personal qualities) of an organization's staff, workforce, or labor resources of an industry, territory, region, or country as a whole.
Pochynok N. V.	Human resources are a special asset of an enterprise, which is a component of the production resources of the enterprise; their formation and development require investments to obtain economic benefits.
Balabanova L. V.	Human resources are the combination of social, psychological, and cultural qualities of employees as the most important components of their personalities.
Soroka O., Salo Ya.	Human resources are one type of flows within enterprises characterized by high mobility, long-term usage, and the possibility of development during usage. The improvement of employees' skills and abilities through training during their work activity is an important feature of human resources that distinguishes them from other types of enterprise resources.

Having examined and analyzed scholars' views, human resources can be defined as a strategic resource encompassing the totality of necessary knowledge, professional skills, experience, and abilities used to achieve the economic and strategic goals of an enterprise. Human resources are considered not merely as a workforce but as a resource that requires investment for effective functioning.

This resource is dynamic and self-renewing, as it undergoes development and improvement. Effective human resource management ensures increased productivity, competitiveness, and innovative development of the enterprise [20].

In the context of ensuring enterprise competitiveness, the key characteristics of human resources are:

- Value of human resources (highly skilled employees demonstrate more effective performance outcomes);
- Individuality of human resources (each employee is an individual with unique abilities, professional skills, and talent for specific activities);
- Imitability impossibility (to replicate a competitor's employee, one must train and develop their own, which requires additional costs);
- Talent and motivation of human **resources** (talented and motivated employees hold leadership positions, creativity, and innovativeness, enabling more effective performance and enterprise competitiveness) [15].

Table 3 – Characteristics of the qualities of human resources in enterprises of the transport industry
Таблиця 3 – Характеристика якостей людських ресурсів підприємств транспортної галузі

Category	**Key Qualities**	**Characteristics for Transport Enterprises**
Personal Qualities	Responsibility	Performing duties in accordance with technological regulations
	Self-organization	Ability to plan working time
	Stress resistance	Maintaining work efficiency under high workload and crisis conditions
	Communication skills	Ability to interact with colleagues, passengers, and service consumers
	Loyalty	Commitment to the company, focus on achieving corporate goals
Business Qualities	Teamwork	Cooperation among employees (mechanics, drivers, electricians, etc.)
	Initiative	Proposing new ideas to optimize production processes
	Organization	Ability to effectively allocate tasks
	Decision-making skills	Independent selection of optimal solutions in non-standard situations
	Quality orientation	Adherence to quality standards, attention to detail
Professional Qualities	Professional knowledge	Understanding the technological production process
	Technical skills	Working with transport means and production equipment
	Work experience	Practical skills accumulated during the execution of production tasks
	Specialized competencies	Material calculation, raw material cost control, knowledge of service delivery specifics
	Compliance with safety standards	Following occupational safety requirements, environmental standards, and driving rules

Considering human resources from this perspective allows a transport enterprise to take a systematic approach to personnel development, to identify key areas for training and professional development, and to adapt management approaches to the actual needs of the enterprise. As a result, this contributes not only to increased labor productivity but also to ensuring the long-term competitiveness of the enterprise in the market.

Such an approach enables the creation of detailed evaluation profiles for employees of various categories, such as line operators, drivers, machinists, technologists, engineers, shift supervisors, quality control specialists, administrative staff, and others. This promotes not only effective management of human resource development but also optimization of recruitment processes, helping to accurately determine the required qualifications and skills for each employee role.

Moreover, this approach allows the creation of personalized training and professional development programs, supporting employees' career growth, potential development, and job satisfaction. It also enables adaptation of human resource development strategies to the specific needs of the enterprise, enhancing overall efficiency and labor productivity.

Intellectualization of human resource potential is the process of developing, improving, and effectively utilizing employees' intellectual abilities to achieve the strategic goals of the organization or society at large. This concept includes the following key aspects:

- Increasing the role of knowledge, skills, creativity, innovative thinking, and the capacity for self-learning in labor activities.
- The totality of knowledge, skills, experience, competencies, motivation, and capacity for development possessed by an individual employee or team.
- The goal of intellectualization is to enhance enterprise competitiveness through strengthening innovation potential; building an adaptive, flexible workforce; and transitioning to a knowledge economy.
- Intellectualization tools include education and lifelong learning; professional training and qualification improvement; implementation of innovative technologies in work processes; creation of environments for creative self-realization; and development of a corporate culture that values knowledge.

- The significance of intellectualization for society and the economy includes reorienting from physical labor to intellectual work; emergence of new professions in IT, science, and analytics; creation of innovative products and services; and growth in labor productivity and quality.

The implementation of digital innovations in human resource management ensures the intellectual development level of enterprise personnel and allows optimization of processes, increasing employee productivity, attracting and retaining talent, as well as adapting to market uncertainty and volatility [18].

Research on the features of human resource development in the digital environment is within the scientific interests of many scholars. In particular, Hrishnova O. and Kopylov D. [4] argue that labor digitalization creates, on the one hand, opportunities for employment organization, and on the other, new forms and methods of employee engagement and human resource management processes. Semykina M., Sikora V., Sikora I. [21] emphasize the importance of applying digital technologies in the employment sphere in the context of post-war recovery and Ukraine's European orientation. Boyarinova K. and Melnychuk V. [17] underline the importance of legislative regulation of digital transformational changes in human capital to strengthen the country's competitiveness. Moroz O. highlights the need to establish investment in labor potential development due to significant changes in approaches to human resource management under digitalization conditions [18].

Specific issues of digital technology influence on modern personnel management practices and digitalization impact on HR are discussed by Dlugopolska I., Huk Yu. [7], as well as in analytical reports by Deloitte, European Commission [6], and World Economic Forum [10].

Thus, digitalization of human resources is the process of implementing digital technologies in all aspects of personnel management to improve efficiency, automate routine processes, and enhance employee experience. The main areas of HR digitalization include:

- Process automation (electronic personnel recordkeeping; automatic time tracking; digital workflows for onboarding and offboarding).
- Digital recruiting (use of platforms such as LinkedIn, Djinni, Work.ua, etc.; automated candidate screening via ATS – Applicant Tracking Systems; use of artificial intelligence for resume pre-screening).
- HR analytics (People Analytics) — collecting and analyzing data on performance, satisfaction, staff turnover; forecasting risks of dismissals or burnout; data-driven management decision-making.
- Digital learning and development (LMS - Learning Management System) — online courses, video tutorials, interactive learning; personalized development paths; automatic tracking of employee progress.
- Communication and corporate culture (internal social networks, messengers, platforms such as Slack, Teams, Workplace; gamification, surveys, virtual events; feedback platforms).
- Self-service portals (employee access to personal information, certificates, applications; submission of leave or sick requests without HR involvement).

The advantages of HR digitalization include reduced workload for HR specialists; process transparency and control; increased employee satisfaction; faster data-driven decision-making; and scalability of HR functions for growing companies.

The development of the digital HR technology market in recent years can be characterized by the following trends: increasing demand for new HR technologies such as AI, machine learning, HR process automation; growing use of augmented and virtual reality in training and development programs; HR data and metrics analytics; intensified use of HR chatbots and virtual assistants; popularity of virtual reality, gamification, and AI in HR; integration with various services; 24/7 social media sourcing and recruiting; the importance of cloud technologies and security tools; automation of HR processes and transition to the metaverse [14].

Digitalization of personnel management is a necessary condition for business development, as it allows adapting to rapid changes and ensuring effective human resource management. Utilizing various digitalization methods enables effective implementation of innovative solutions in HR teams' activities and achieving better personnel management results. In our opinion, trends in the use of digital HR technologies should be expanded and supplemented with aspects such as automation and integration of HR processes, e-learning and development, use of HR analytics systems, focus on emotional well-being in digital environments, and development of mobile HR applications (see Fig. 2).

Trends in the use of digital HR technologies	
Automation and integration of HR processes	Organizations increasingly use digital solutions to automate routine HR tasks such as hiring, time tracking, leave request processing, and payroll. These solutions also integrate with other organizational systems, enhancing convenience and efficiency in HR.
Use of artificial intelligence and analytics	Artificial intelligence and analytics play an important role in HR business processes. They help collect and analyze large volumes of employee data, identify trends in productivity and engagement, predict turnover, and detect key skills needed for personnel development.
Electronic learning and development	Digital technologies enable organizations to implement effective e-learning systems (online courses, webinars, mobile learning apps, and other interactive tools). E-learning allows employees to study at convenient times, increases access to learning materials, and ensures continuous self-education.
Workforce analytics systems	The development of workforce analytics systems allows organizations to gain deep insights into employee interactions and measure productivity. This helps managers make informed decisions about organizing workflows, task distribution, and personnel development.
Use of chatbots and virtual assistants	Organizations increasingly deploy chatbots and virtual assistants to ensure fast communication with employees, answer their questions, provide information about company policies and procedures, and support HR management processes.
Use of cloud technologies	Storing and processing personnel data in cloud services is becoming more popular. Cloud technologies provide quick access to data from any device and facilitate collaborative work on projects and documents.
Focus on emotional well-being in digital environments	Digital technologies are also used to measure and improve employees' emotional well-being. Apps and platforms track stress levels, job satisfaction, and overall employee self-care, enabling organizations to respond to issues and implement support programs.
Extended and virtual reality	The use of extended and virtual reality in training programs and workshops allows employees to gain practical experience and virtual simulations of real workplace situations.
Mobile apps for personnel management	Mobile device applications enable employees and managers to perform essential HR functions such as submitting leave requests, tracking working hours, and accessing learning materials and communication with colleagues.

Figure 2 – Trends in the Use of Digital HR Technologies
Рисунок 2 – Тенденції використання цифрових HR технологій

Such trends in the use of digital HR technologies contribute to automation, increased efficiency, and improved interaction between employees and the organization; they help make personnel management more effective by supporting the development and retention of talents in the modern digital environment [14].

Based on these trends, the concept of digitalization of personnel management can be defined as a strategic approach to the implementation of digital technologies and tools aimed at improving efficiency, automating, and optimizing human resource management within an organization. This approach relies on the use of a wide range of digital solutions, such as automated personnel management systems, artificial intelligence, data analytics, e-learning, and other innovative technologies widely implemented in the transport industry.

The field of transport logistics is considered one of the priorities for the implementation of solutions based on Internet of Things (IoT) technology, which involves the interaction of physical objects, devices, and systems with each other and the environment using various communication technologies. IoT connectivity is built on other technologies such as Wi-Fi, RFID, Bluetooth, and LTE. Cloud technologies and Big Data are used to store and process the collected data.

The implementation of IoT technology will provide the following advantages [13]:
- reduction of freight transportation costs and delays;
- increased transparency of logistics operations (particularly through RFID tags);
- minimization of human factor influence;
- optimization of vehicle maintenance and repair.

The global application volume of IoT in the transport market was estimated at USD 85.21 billion in 2022 and is expected to reach about USD 498.47 billion by 2032, growing at a compound annual growth rate (CAGR) of 21.69% during the forecast period from 2023 to 2032 (Fig. 3).

The size of the global automated parking systems market exceeded USD 1.67 billion in 2022 and is forecasted to reach USD 6.78 billion by 2032, growing at a CAGR of 15.1% from 2023 to 2032. The global vehicle tracking systems market exceeded USD 21.16 billion in 2022 and is estimated to reach approximately USD 80.17 billion by 2032, growing at a CAGR of 14.30% from 2023 to 2032 [6].

Digitalization affects not only individual transport and logistics companies but also serves as a topic of dialogue between the state and business.

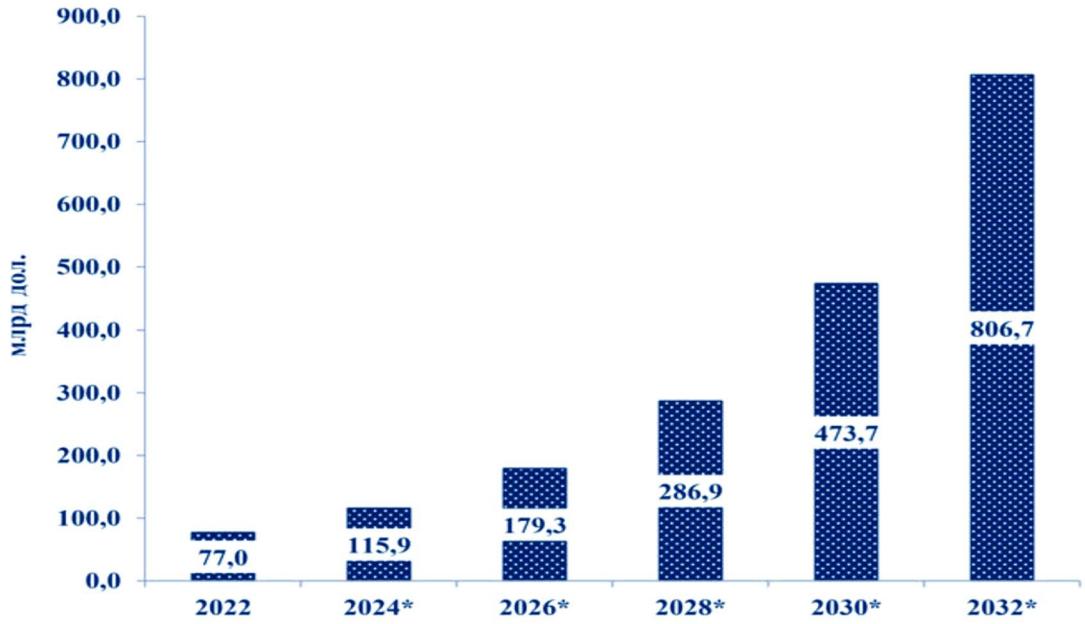


Figure 3 – The Impact of IoT Digital Technology on the Growth Prospects of the Transport Services Market (USD billion)

Рисунок 3 – Вплив цифрової технології IoT на перспективи зростання ринку транспортних послуг (млрд дол. США)

There is a need to create a unified digital platform for the country's transport complex, which will enable:
- improving the safety, quality, and accessibility of transportation;
- reducing costs;
- ensuring maximum utilization of infrastructure;

- expanding the country's export and transit capabilities;
- opening new growth opportunities for the transport sector.

In the context of digitalization, a modern employee in the transport industry must possess a set of key skills that enable effective work in new technological conditions and support their professional development. The World Economic Forum highlighted the main skills in *The Future of Jobs Report*, based on research into the impact of digital transformation on the future of jobs and management practices in HR:

- Digital literacy - knowledge and understanding of basic digital tools and technologies, ability to use email, social media, messengers, office software, and other digital tools;
- Analytical skills - ability to analyze and interpret data using analytical tools and platforms to make informed decisions;
- Communication skills - ability to communicate effectively in an online environment, write clearly and concisely in emails and documents, using various communication channels;
- Self-organization and time management - ability to plan work, set priorities, and use calendar planning and task management tools;
- Multitasking skills- ability to efficiently perform multiple tasks simultaneously in an online environment, managing different projects and assignments without losing productivity;
- Creativity and innovation - ability to think creatively, propose new ideas, and adapt to rapid changes and technological innovations;
- Teamwork skills - ability to collaborate with colleagues worldwide using virtual communication tools for effective interaction and joint work;
- Self-learning skills - ability to independently learn new technologies and tools, updating knowledge and skills according to changes in the work environment.

These skills allow modern employees to successfully integrate into the digital work environment, develop professionally, and effectively perform their duties amid changes in the technological paradigm.

The introduction of advanced approaches to human resource management enables enterprises to effectively compete in the labor market, attract and retain highly qualified employees, which is key to the successful functioning and development of the organization [28].Conclusions

Intellectualization is a purposeful, continuous, constant, and dynamic process, the results of which manifest in all spheres of social and individual life—from the individual to global systems. The intellectualization of socio-economic processes and relations is characterized by the expansion of the scale and enhancement of the efficiency of knowledge and intellectual use, which is reflected in new qualities of socio-economic systems of all types and levels (economy, transport, industry, business and trade, education, enterprise, production, management, labor, etc.). The main resources of an intellectualized economy are the knowledge of human resources and information, which have their own specific characteristics of formation and use (virtual form of existence; inexhaustibility with active use, etc.).

Conclusions. Intellectualization is a purposeful, continuous, constant, and dynamic process, the results of which manifest in all spheres of social and individual life—from the individual to global systems. The intellectualization of socio-economic processes and relations is characterized by the expansion of the scale and enhancement of the efficiency of knowledge and intellectual use, which is reflected in new qualities of socio-economic systems of all types and levels (economy, transport, industry, business and trade, education, enterprise, production, management, labor, etc.). The main resources of an intellectualized economy are the knowledge of human resources and information, which have their own specific characteristics of formation and use (virtual form of existence; inexhaustibility with active use, etc.).

The intellectualization of labor acts as an intensifier of the development processes of socio-economic systems at various levels, occurring on the basis of activating the intellectual labor of human resources and its most optimal use, ensuring the penetration of such intellectualization results into various spheres of life and economic activity (management, production, science, education, etc.).

In summary, due to the impact of digitalization, informatization, and virtualization, the role of human resources is changing, raising further questions about the development of human capital in Ukraine. At the

same time, it cannot be said that this process is happening rapidly, since retraining, the creation of new professions in the education sector, and the development of the legislative framework are reactive, following global trends and challenges of the digital economy and society. For the digitalization of human resources, it is necessary to implement appropriate legislative regulators that will simplify and enable transport enterprises and employees to transition to training and retraining, adapting to the new realities of digitalization and, subsequently, virtualization of society. The creation of digitalization strategies for human capital development and enterprises as a whole will allow for further effective decisions and increased productivity.

The main methods of digitalizing HR processes include the use of social networks, artificial intelligence, communication bots, HRM systems, cloud technologies, Big Data, gamification, and virtual reality. The concept of HR digitalization involves a strategic approach to implementing digital technologies and tools to improve efficiency, automate, and optimize human resource management. The key principles of this concept are process automation, the use of artificial intelligence and analytics, e-learning, workforce analytics, ensuring effective remote work, and data security. Digitalization of personnel management enables increased efficiency of HR processes, attraction and development of talented employees, improvement of communication and collaboration, as well as adaptation to rapidly changing market demands. The introduction of digital tools and technologies into human resource management becomes a key success factor for organizations in the modern business environment.

The digitalization of transport systems aims to create a unified IT environment for interdependent complexes and technologies related to traffic organization and management of a unified technological process, integrating all types of transport and market participants. Digital transformation involves transitioning to electronic document management, implementing intelligent transport systems and vehicles, realizing the "single window" mechanism, and digital logistics. Innovative developments in modeling transport systems and regulating transport flows should provide end consumers with greater informativeness and safety, as well as qualitatively improve the level of interaction among all participants.

References

1.Butnik-Siverskyi O. B. Intelektualnyi kapital (teoretychnyi aspekt) [Elektron. resurs]. Rezh. dostupu: http://dspace.nuft.edu.ua/bitstream/123456789/9823/1/intelektualnii_kapital.pdf

2.Briukhovetska N.Iu., Bohutska O.A. Intelektualizatsiia pidpryiemstv: pidkhody, sutnist, struktura. Ekonomichnyi visnyk Donbasu. 2020. №1(59). S. 92-100. doi: 10.12958/1817-3772-2020-1(59)-92-100

3.Haikova T.V., Zahorianskyi V.H., Leontovych A.O.Vprovadzhennia tsyfrovykh tekhnolohii v upravlinnia lantsiuhamy postachan. Tsentralno-ukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. 2023. Vyp. 7 (38), ch. I. S. 222-228.

4. Hrishnova O. A., Kopylov D.V. Osoblyvosti zaluchennia ta utrymannia personalu v umovakh viiny ta didzhy¬talizatsii pratsi. Teoretychni ta prykladni pytannia ekonomiky. Zbirnyk naukovykh prats. Kyiv : TOV «TsP «KOMPRYNT». 2023. Vypusk 2 (47). hruden. S. 35–48.

5.Hryhorak M. Yu. Intelektualizatsiia rynku lohistychnykh posluh: kontseptsiia, metodolohiia, kompetentnist: monohrafiia / M.Iu. Hryhorak. - K.: Sik Hrup Ukraina, 2017. 513 s.

6. Castellanos, S. - Grant_muller, S. - Wright, R.(2022). Technology, transport, and the sharing economy: towards a working taxonomy for shared mobility,Transport Review, Volume 42, Issue 3 pr. 318-336.

7. Dluhopolska T. I., Huk Yu. V. Tsyfrova transformatsiia u sferi HR: napriamy, problemy ta mozhlyvosti / O.V. Prychornomorski ekonomichni studii – Black Sea Economic Studies, 62, 2021. S.13-18. DOI: https://doi.org/10.32843/bses.62-2.

8.Zaichenko O.I., Kuznetsova V.I. Upravlinnia liudskymy resursamy : navchalnyi posibnyk / za nauk. red.O.I. Zaichenko. Ivano-Frankivsk : Lileia-NV, 2015. 232 s.

9.Intelektualni transportni systemy v Ukraini / A. R. Haikov, O. P. Yevsieieva, O. V. Baranov, V. Yu. Baranov // Visnyk Nats. tekhn. un-tu «KhPI» : zb. nauk. pr. Temat. vyp. : Avtomobile-ta traktorobuduvannia. - Kharkiv : NTU «KhPI». - 2014. № 9 (1052). S. 106-112.

10. Irtyshchev O. S., Harahulia A. V., Stavtsov R. V. (2022). Rozvytok tsyfrovoi ekonomiky ta

suspilstva: trendy, ryzyky ta sotsialni determinanty / O.V. Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky ta tekhniky 4(7), 193–199. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2022-4-28

11. Kolot A., Herasymenko O. Tsyfrova transformatsiia ta novi biznes-modeli yak determinanty formuvannia ekonomiky nestandartnoi zainiatosti / O.V. Sotsialno-trudovi vidnosyny: teoriia i praktyka, 10(1), 33–54. https://doi.org/10.21511/slrtp.10(1).2020.06

12.Kontseptsiia rozvytku tsyfrovoi ekonomiky ta suspilstva Ukrainy na 2018–2020 roky ta plan zakhodiv shchodo yii realizatsii : Rozporiadzhennia Kabminu Ukrainy vid 17.01.2018 N 67-r. URL: https://ips.ligazakon.net/document/MN020832 (data zvernennia: 01.05.2025).

13. Kornaha Ya.I. Doslidzhennia ta zastosuvannia tekhnolohii blokchein u transportnii lohistytsi/Visnyk ZhDTU.Seriia "Tekhnichni nauky".2019. № 1 (83). S. 12-17.

14. Kravchuk O., Varis I. ta Riabokon I. Upravlinnia tsyfrovoiu HR transformatsiieiu menedzhmentu personalu cherez tsyfrovu HR stratehiiu / O.V. Infrastruktura rynku - Rynkova infrastruktura, (71). 2023. Doi: https://doi.org/10.32782/infrastruct71-28

15.Lopatynskyi Yu., Kyfiak V. Stratehichne upravlinnia liudskymy resursamy: navch.-metod. posib. / Chernivtsi : Chernivets. nats. un-t im. Yu. Fedkovycha, 2024. 216 s. ISBN 978-966-423-878-3

16.Liudskyi rozvytok v Ukraini. Innovatsiini vydy zainiatosti ta perspektyvy yikh rozvytku : monohrafiia. / za red. E.M. Libanovoi. K. 2016. 328 s.

17.Melnychuk V. E., Boiarynova K. O. Tsyfrovizatsiia rozvytku liudskoho kapitalu. Ekonomichnyi visnyk NTUU «Kyivskyi politekhnichnyi instytut». 2023. № 25. S. 21–25.
DOI: https://doi.org/10.20535/2307-5651.25.2023.278414

18.Moroz O. S. Liudski resursy v umovakh tsyfrovizatsii ekonomiky. Pryazovskyi ekonomichnyi visnyk. 2020. Vypusk 6(23). S. 195–199. DOI: https://doi.org/10.32840/2522-4263/2020-6-35

19. Nykyforuk O. I., Stasiuk O. M., Chmyrova L. Yu., Fediai N. O. Tsyfrovizatsiia v transportnomu sektori: tendentsii ta indykatory rozvytku. Chastyna 2 // Statystyka Ukrainy. 2019. № 4. S. 48-64.

20.Savkiv U., Lesyk M., Liubchenko O. Upravlinnia liudskymy resursamy v umovakh turbulentnosti ta tsyfrovizatsii. Naukovi perspektyvy. 2024. № 5 (47). S. 973-982
https://doi.org/10.52058/2708-7530-2024-5(47)-973-982

21.Semykina M. V., Sikoraka V. I., Sikoraka I. O. Innovatsiini zminy u zmisti pratsi ta zainiatosti v umovakh didzhytalizatsii ta rukhu v YeS. Naukovyi visnyk Lotnoi akademii. Seriia : Ekonomika, menedzhment ta pravo. 2023. Vyp. 8. S. 29-40.

22.Slovnyk inshomovnykh sliv [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu : http://slovopedia.org.ua/36/53382/240577.html

23.Sytnyk Y. S. Intelektualnyi potentsial yak faktor intelektualizatsii system menedzhmentu pidpryiemstva / Y. S. Sytnyk // Ekonomichnyi visnyk NTU KPI. 2012. №49. Elektronnyi resurs. –[Rezhym dostupu: economy.kpi.ua/uk/node/377].

24.Spitsyna A.Ie. Innovatsiini tekhnolohii upravlinnia personalom transportnoi haluzi v epokhu tsyfrovoi ekonomiky./ Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "Internauka". Seriia: "Ekonomichni nauky" za nast.posyl.: https://www.inter-nauka.com/issues/economic2023/12/9635

25.Spitsyna A.Ie. INTELEKTUALNA KULTURA PERSONALU TRANSPORTNOI HALUZI UKRAINY V UMOVAKh YeVROINTEHRATsII. "Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Ekonomichni nauky". Tom 330 № 3.2024. S.148-156. https://heraldes.khmnu.edu.ua/index.php/heraldes/issue/view/4
DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-330-22

26. Stromaier S. Tsyfrove upravlinnia liudskymy resursamy: kontseptualne roziasnennia. Nimetskyi zhurnal upravlinnia liudskymy resursamy: Zeitschrift für Personalforschung, 34. 2020.
S.345–365. Doi: https://doi.org/10.1177/2397002220921131

27.Ukrainskyi tlumachnyi slovnyk. [Elektr. resurs]. Rezh. dostupu : http://ukrainianexplanatory academic.ru.

28.Chornodid I.C., Vasylets N.M., Fedotov O.O. Innovatsiini stratehii upravlinnia liudskymy resursamy v umovakh tsyfrovizatsii. Problemy suchasnykh transformatsii. 2024. № 13. URL: https://reicst.com.ua/pmt/article/view/2024-13-04-09/2024-13-04-09

29.Shchokina Ye.Iu., Balaban L.Iu., Martynenko K.A. Suchasni tekhnolohii upravlinnia liudskymy resursamy.Rozvytok produktyvnykh syl i rehionalna ekonomika. 2020. № 43. S. 338–342.

30.Rybchuk A. V., Paziuk R. I., Pantiuk Yu. M. Tsyfrova transformatsiia transportnykh system v informatsiinii ekonomitsi. Investytsii: praktyka ta dosvid. № 6. 2024.
DOI: 10.32702/2306_6814.2024.6.51

31.Dyba V. I. Intelektualnyi potentsial pidpryiemstva ta metody yoho otsinky. Rynok tsinnykh paperiv Ukrainy. 2013. No 9–10. S. 97–101. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rcpu.2013. 9-10.

32. Yanovska V.P., Medyna A.P. Osoblyvosti ekonomichnoho rozvytku transportnykh kompanii v umovakh tsyfrovizatsii. Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriia "Ekonomika i upravlinnia", 2023. Bun. 53. S. 40-48.

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЛЮДСЬКИХ РЕСУРСІВ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

Спіцина Ангеліна Євгенівна, кандидатка пед.наук, доцентка, професорка кафедри економіки, Національний транспортнийуніверситет, angel7a@ukr.net, tel. +380679053181,Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, https:// orcid.org/0000-0001-9730-6249

Голова Інна Георгіївна, аспірантка кафедри економіки, Національний транспортний університет, inna.golova@gmail.com, tel. +380677786658, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, https://orcid.org/ 0000-0001-9717-7109

Нестеренко Олександр Олександрович, аспірант кафедри економіки, Національний транспортний університет, Nesterenko1212@gmail.com, tel. +380632017418, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, https:// orcid.org/0009-0003-4686-877X

Анотація. У статті розглянуто питання розвитку інтелектуального потенціалу в умовах цифрової трансформації суб'єктів господарювання, висвітлено еволюцію підходів до управління людськими ресурсами, що демонструють перехід від механістичного сприйняття працівників до інтеграції концепцій людського капіталу та стратегічного HR-менеджменту. Досліджено, що інтелектуалізація праці є інтенсифікатором процесів розвитку соціально-економічних систем різних рівнів, що відбувається на засадах активізації інтелектуальної праці людських ресурсів та її найоптимальнішому використанні, забезпечуючи проникнення результатів такої інтелектуалізації у різні сфери життя та господарювання підприємств транспортної галузі. Визначено, що стратегічним ресурсом для формування інтелектуального капіталу є людські ресурси, які формується в умовах цифрової трансформації суб'єктів господарювання і є джерелом інновацій на транспортному підприємстві.

Цифровізація безупинно впливає на всі сфери економіки, в тому числі й на транспорту сферу, котра відповідно до глобальних запитів змушена перебудувати свою діяльність (військові дії, пандемія). У статті зазначено, що розвиток цифрових систем необхідний транспорту для того, щоб зробити галузь зручнішою для людей та розвитку бізнесу. Людські ресурси генерують конкурентну перевагу суб'єкта господарювання, яка вважається специфічним фактором і відрізняє одне підприємство від іншого.

Висновки дослідження підкреслюють, що успішне управління потенціалом людських ресурсів в сучасному динамічному та складному бізнес-середовищі вимагає комплексного підходу, який враховує як традиційні аспекти, так і сучасні виклики. Глибоке розуміння та ефективне управління людськими ресурсами є вирішальним для забезпечення конкурентоспроможності, інноваційного розвитку та сталого успіху підприємств транспортної галузі.

Ключові слова: інтелектуалізація, потенціал, людські ресурси, еволюція, розвиток, управління, підприємства, транспорт, галузь, цифровізація, концептуальні підходи

Перелік посилань

1.Бутнік-Сіверський О. Б. Інтелектуальний капітал (теоретичний аспект) [Електрон. ресурс]. Реж. доступу: http://dspace.nuft.edu.ua/bitstream/123456789/9823/1/intelektualnii_kapital.pdf.

2.Брюховецька Н.Ю., Богуцька О.А. Інтелектуалізація підприємств: підходи, сутність, структура. *Економічний вісник Донбасу*. 2020. №1(59). С. 92-100.
doi: 10.12958/1817-3772-2020-1(59)-92-100

3.Гайкова Т.В., Загорянський В.Г., Леонтович А.О.Впровадження цифрових технологій в управління ланцюгами постачань. *Центрально-український науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7 (38), ч. І. С. 222-228.

4. Грішнова О. А., Копилов Д.В. Особливості залучення та утримання персоналу в умовах війни та діджиталізації праці. *Теоретичні та прикладні питання економіки. Збірник наукових праць.* Київ : ТОВ «ЦП «КОМПРИНТ». 2023. Випуск 2 (47). грудень. С. 35–48.

5.Григорак М. Ю. Інтелектуалізація ринку логістичних послуг: концепція, методологія, компетентність: монографія / М.Ю. Григорак**.** - К.: Сік Груп Україна, 2017. 513 с.

6. Castellanos, S. - Grant_muller, S. - Wright, R.(2022). Technology, transport, and the sharing economy: towards a working taxonomy for shared mobility,Transport Review, Volume 42, Issue 3 pp. 318-336.

7. Длугопольська Т. І., Гук Ю. V. Цифрова трансформація у сфері HR: напрями, проблеми та можливості / *О.В. Причорноморські економічні студії* – Black Sea Economic Studies, 62, 2021. С.13-18. DOI: https://doi.org/10.32843/bses.62-2.

8.Зайченко О.І., Кузнецова В.І. Управління людськими ресурсами : навчальний посібник / за наук. ред.О.І. Зайченко. Івано-Франківськ : Лілея-НВ, 2015. 232 с.

9.Інтелектуальні транспортні системи в Україні / А. Р. Гайков, О. П. Євсєєва, О. В. Баранов, В. Ю. Баранов // *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»* : зб. наук. пр. Темат. вип. : Автомобіле-та тракторобудування. - Харків : НТУ «ХПІ». - 2014. № 9 (1052). С. 106-112.

10. Іртищев О. С., Гарагуля А. В., Ставцов Р. В. (2022). Розвиток цифрової економіки та суспільства: тренди, ризики та соціальні детермінанти / О.В. *Український журнал прикладної економіки та техніки* 4(7), 193–199. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2022-4-28

11. Колот А., Герасименко О. Цифрова трансформація та нові бізнес-моделі як детермінанти формування економіки нестандартної зайнятості / О.В. *Соціально-трудові відносини: теорія і практика*, 10(1), 33–54. https://doi.org/10.21511/slrtp.10(1).2020.06

12.Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки та план заходів щодо її реалізації : Розпорядження Кабміну України від 17.01.2018 N 67-р. URL: https://ips.ligazakon.net/document/MN020832 (дата звернення: 01.05.2025).

13. Корнага Я.І. Дослідження та застосування технології блокчейн у транспортній логістиці/*Вісник ЖДТУ.Серія "Технічні науки*".2019. № 1 (83). С. 12-17.

14. Кравчук О., Варіс І. та Рябоконь І. Управління цифровою HR трансформацією менеджменту персоналу через цифрову HR стратегію / О.В. Infrastruktura rynku - *Ринкова інфраструктура*, (71). 2023. Doi: https://doi.org/10.32782/infrastruct71-28

15.Лопатинський Ю., Кифяк В. Стратегічне управління людськими ресурсами: навч.-метод. посіб. / Чернівці : Чернівец. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2024. 216 с. ISBN 978-966-423-878-3

16.Людський розвиток в Україні. Інноваційні види зайнятості та перспективи їх розвитку : монографія. / за ред. Е.М. Лібанової. К. 2016. 328 с.

17.Мельничук В. Е., Бояринова К. О. Цифровізація розвитку людського капіталу. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут».* 2023. № 25. С. 21–25.
DOI: https://doi.org/10.20535/2307-5651.25.2023.278414

18.Мороз О. С. Людські ресурси в умовах цифровізації економіки. *Приазовський економічний вісник*. 2020. Випуск 6(23). С. 195–199. DOI: https://doi.org/10.32840/2522-4263/2020-6-35

19. Никифорук О. І., Стасюк О. М., Чмирьова Л. Ю., Федяй Н. О. Цифровізація в транспортному секторі: тенденції та індикатори розвитку. Частина 2 // Статистика України. 2019. № 4. С. 48-64.

20.Савків У., Лесик М., Любченко О. Управління людськими ресурсами в умовах турбулентності та цифровізації. *Наукові перспективи.* 2024. № 5 (47). С. 973-982 https://doi.org/10.52058/2708-7530-2024-5(47)-973-982

21.Семикіна М. В., Сікорака В. І., Сікорака І. О. Інноваційні зміни у змісті праці та зайнятості в умовах діджиталізації та руху в ЄС. *Науковий вісник Льотної академії. Серія : Економіка, менеджмент та право.* 2023. Вип. 8. С. 29-40.

22.Словник іншомовних слів [Електронний ресурс]. Режим доступу : http://slovopedia.org.ua/36/53382/240577.html

23.Ситник Й. С. Інтелектуальний потенціал як фактор інтелектуалізації систем менеджменту підприємства / Й. С. Ситник // Економічний вісник НТУ КПІ. 2012. №49. Електронний ресурс. –[Режим доступу: economy.kpi.ua/uk/node/377].

24.Спіцина А.Є. Інноваційні технології управління персоналом транспортної галузі в епоху цифрової економіки./ Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". Серія: "Економічні науки" за наст.посил.: https://www.inter-nauka.com/issues/economic2023/12/9635

25.Спіцина А.Є. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА КУЛЬТУРА ПЕРСОНАЛУ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ. *"Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Економічні науки".* Том 330 № 3.2024. С.148-156. https://heraldes.khmnu.edu.ua/index.php/heraldes/issue/view/4

DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-330-22

26. Стромайер С. Цифрове управління людськими ресурсами: концептуальне роз'яснення. Німецький журнал управління людськими ресурсами: Zeitschrift für Personalforschung, 34. 2020.

С.345–365. Doi: https://doi.org/10.1177/2397002220921131

27.Український тлумачний словник. [Електр. ресурс]. Реж. доступу : http://ukrainianexplanatory academic.ru.

28.Чорнодід І.С., Василець Н.М., Федотов О.О. Інноваційні стратегії управління людськими ресурсами в умовах цифровізації. Проблеми сучасних трансформацій. 2024. № 13. URL: https://reicst.com.ua/pmt/article/view/2024-13-04-09/2024-13-04-09

29.Щьокіна Є.Ю., Балабан Л.Ю., Мартиненко К.А. Сучасні технології управління людськими ресурсами.*Розвиток продуктивних сил і регіональна економіка*. 2020. № 43. С. 338–342.

30.Рибчук А. В., Пазюк Р. І., Пантюк Ю. М. Цифрова трансформація транспортних систем в інформаційній економіці. *Інвестиції: практика та досвід.* № 6. 2024.

DOI: 10.32702/2306_6814.2024.6.51

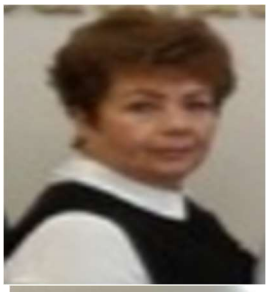
31.Диба В. І. Інтелектуальний потенціал підприємства та методи його оцінки. Ринок цінних паперів України. 2013. No 9–10. С. 97–101. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rcpu.2013. 9-10.

32. Яновська В.П., Медина А.П. Особливості економічного розвитку транспортних компаній в умовах цифровізації. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія "Економіка і управління", 2023. Вип. 53. С. 40-48.

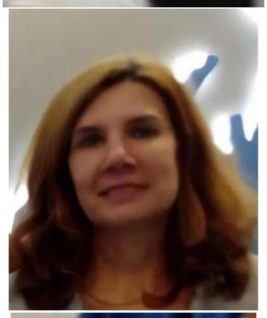
UDC 338.48.6
УДК 338.48.6
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-448-457

INTERNATIONAL TRANSPORT IN TOURISM

МІЖНАРОДНІ ТРАНСПОРТНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ В ТУРИЗМІ



Ivanchuk Svitlana I., *Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Tourism, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: lana - 50@ukr.net, тел.. +380987667900*
https // orcid.org/ 0009-0006-8239-6433

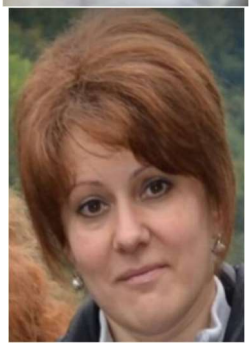


Artemchuk Valentyna O.*, Senior Lecturer of the Department of Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovicha-Pavlenko, e-mail: artemchuk@ntu.edu.ua, тел.. +380677473944*

https://orcid.org/my-orcid/ 0000-0001-7326-1373



Bondarenko Vladislava A.*, Senior Lecturer, Department of Tourism, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: vladislawa.b@gmail.com, тел.. +380963603191*
https // orcid.org/0000-0003-4712-1662



Borysova Oksana V., *Candidate of Geography Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Tourism, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: mariaborysova@gmail.com, тел.. +380678883791*
https://orsid.org/0000-0002-6379-0471

Abstract. This article explores the role of international transport in the development of the tourism sector, emphasizing its importance in ensuring tourist mobility, facilitating economic growth, and fostering international cooperation. The research identifies key challenges that hinder the effective functioning of international transport in tourism, including environmental concerns, security threats, infrastructure destruction, and rising operational costs. Special attention is given to the impact of geopolitical crises,

particularly the war in Ukraine, on international transport and tourism, as well as the subsequent disruptions in global travel patterns.

The study analyzes statistical data on the recovery of international tourism and transport in recent years, highlighting trends in air, rail, road, and maritime travel. Additionally, the article examines emerging forms of tourism, such as military and solidarity tourism, which have gained relevance in conflict-affected regions. The findings suggest that the future development of international transport in tourism depends on the modernization of infrastructure, the adoption of digital and eco-friendly technologies, and strategic policy adjustments to enhance global mobility and sustainability.

The study concludes that despite ongoing challenges, the tourism and transport sectors hold significant potential for recovery and growth. Investment in smart transport systems, green transportation solutions, and cross-border cooperation will be crucial in shaping a resilient and adaptive international tourism industry in the coming years.

Keywords. international transport, tourism, economic development, security, infrastructure losses, military tourism, environmental challenges, transport innovations.

Introduction. The significance of the tourism industry worldwide is constantly growing due to its crucial role in the economic development of regions and entire countries, the expansion of international relations, and foreign currency inflows. With the implementation of appropriate cultural and economic policies, tourism serves as a stabilizing factor, strengthening interstate relations and positively contributing to the country's image and prestige on the global stage [1].

International transport plays a key role in the development of the tourism industry by ensuring tourist mobility and accessibility to various regions of the world. An efficient transport system promotes tourism growth, enhances the economic development of countries, and improves the quality of tourism services.

However, despite the importance of international transport in tourism, there are several challenges that hinder its development. These include issues related to logistics, transportation costs, environmental concerns, regulatory frameworks, and ensuring the safety of tourists during travel.

This issue is critical not only for tourism companies but also for government authorities responsible for transport and tourism policies. Addressing these challenges will not only enhance the tourist experience but also contribute to the sustainable development of the global economy and transport infrastructure.

Purpose and methods. The objective of this study is to analyze the functioning of international transport in the tourism sector, identify key challenges and development prospects, and develop recommendations for improving the efficiency of transport infrastructure in the face of global challenges.

The object of the process of using international transport services in tourism.

The research methods are statistical - to determine real changes in the transport industry; systems analysis - to determine dynamic changes in the tourism industry under the challenges of war.

Results and explanations. The topic of the development and recovery of international transport in tourism is currently relevant and attracts significant interest from the scientific community. An analysis of research on international transport in tourism reveals several key trends and findings:

In the article *"Peculiarities of the Formation of Innovative Trends in the Tourism Sector Based on Modern Consumer Needs"* [1], the authors explore the formation of innovative trends in tourism, taking into account modern consumer demands. They emphasize the importance of adapting tourism services to new conditions.

Vyhovskyi D.S. analyzes trends and prospects for the development of tourism in Ukraine and globally [4]. The study indicates that international tourism is gradually recovering after the pandemic but faces new challenges, particularly economic and geopolitical issues.

According to Melnyk K., in 2024, the tourism industry has almost fully returned to pre-pandemic levels, with over 1.4 billion people traveling worldwide [5]. This highlights significant growth in international transport within the tourism sector.

Kompanets K.A., Horodetskyi M.Ya., and Miska V.G. [15] examine strategies for the innovative development of the hotel business during the COVID-19 pandemic. These strategies directly influence international transport, as the hotel industry is closely linked to tourism.

Kompanets K.A., Lytvyshko L.O., and Ilchenko V.Yu. [16] explore innovative marketing technologies and business analytics in foreign economic activity for managing risks in transport enterprises. This study is particularly relevant to international transport in tourism, as it helps optimize processes and mitigate risks.

Overall, the studies indicate a gradual recovery of international transport in tourism following the pandemic, though new challenges require the implementation of innovative approaches. The authors emphasize the importance of adapting to new conditions, utilizing technology, and effectively managing risks to ensure the sustainable development of the sector. However, the post-war recovery and development of international transport in tourism, along with the dynamics of changes in this field, remain insufficiently explored. Therefore, further analysis of these unexplored issues is necessary.

Before the COVID-19 pandemic and the full-scale invasion, the tourism sector accounted for 2.3% of Ukraine's GDP and provided approximately 375,000 jobs. However, the real contribution of tourism to the quality of life and well-being of Ukrainians was even greater, as its multiplier effect stimulated spending in related industries such as transportation, trade, and food services. This indirect impact amounted to 7% of GDP and 1.2 million jobs in 2019 [2].

Currently, the situation in the tourism market is not very positive. Domestic tourism remains an advantage, but due to the war, international tourism has become a rather expensive type of leisure. We have examined global statistics on the development of international tourism in recent years. Over the past few years, international tourism has shown a gradual recovery following the COVID-19 pandemic, although it has also been affected by other factors, including the war in Ukraine. The key data for the period 2022–2024 are as follows:

- In 2023, the number of international tourists reached 1.286 billion, which is 88% of the 2019 level [3].
- In 2024, global tourism almost fully recovered, reaching 1.4 billion tourists (99% of the 2019 level) [4, 5].
- Total tourism revenue in 2023 amounted to $1.6 trillion, while in 2024, it increased to $1.9 trillion [3].
- The war has impacted Eastern European tourism: the Baltic states and Finland experienced a significant decline in tourist flows (up to -32% in Lithuania) [3].
- Despite martial law, a record tourist tax of 47.95 million UAH was collected in Kyiv in 2024 [4].
- Tourism in Europe has almost completely recovered to pre-pandemic levels due to high travel demand [7].
- An increase in the popularity of destinations with a good price-to-quality ratio: Serbia (+15%), Portugal (+11%), Montenegro (+10%) [7].

International transport plays a key role in the development of the tourism industry. It ensures tourist mobility, contributes to the economic growth of countries, and facilitates cultural exchanges between nations. The primary modes of transport used in international tourism are air, rail, road, and water transport.

International transport is an integral part of the tourism industry. It establishes connections between countries, stimulates economic development, and promotes cultural exchange. For the further advancement of this sector, it is essential to consider contemporary challenges and implement innovative solutions to improve service quality. A particular trend in the global tourism market is emerging regarding the use of different types of transport (Table 1).

International transport continues to play a key role in the recovery of tourism, although regional conflicts and economic challenges impact its development.

International tourism in Ukraine has undergone significant changes from 2022 to 2024 due to war and economic challenges. However, despite these difficulties, the tourism industry is showing signs of recovery and growth. Statistics on international transport in Ukraine (2022–2024) (Tables 1, 2).

Table 1 – Global tourism trends, regarding the use of modes of transport.
Таблиця 1 – Глобальні тенденції в туризмі щодо використання видів транспорту.

Types of transport	Features of use in international tourism
Air transport	- The main mode of transportation for international tourism. - In Europe, in the last quarter of 2023, the flow of tourists via air transport was only 1.6% lower than the 2019 level[7]. - Growth in air transportation in countries with developed infrastructure, such as Qatar (+137% in 2024)[4].
Road transport	- Popular for domestic and short international trips. - In European countries, it remains important for regional tourism.
Rail transport	- Used primarily in Europe for intercity and international travel. - Demand is growing due to environmental benefits.
Water transport	- Cruises and ferry transportation remain popular, especially in the Mediterranean region.

Source: compiled by the authors.

Table 1 – Statistics of international transport in Ukraine (2022–2024)
Таблиця 1 – Статистика міжнародних перевезень в Україні (2022–2024)

Indicator	2023 (billion UAH)	2024 (billion UAH)	2024 (billion UAH)
Net income of tourism companies.	16,3	5,8 (First half of the year)	+29% (First half of the year)
Tax revenues (First half of the year)	-	0,616	+61%
The server is busy. Please try again later.	0,9	1,25	+39%

Table 2 – Distribution of revenues by region (1 half year 2024)
Таблиця 2 – Розподіл доходів за регіонами (1 півріччя 2024 року)

Region	Revenue (billion UAH)	Share (%)
Kyiv	3,1	54%
Lviv Region	1,1	19,1%
Ivano-Frankivsk Region	0,852	15%

Source: compiled by the author [8-10].

Kyiv is the leader in tourism business revenue, generating more than half of all industry income.

Transport and tourism are closely interconnected: the development of one sector directly affects the other. For example, the growing popularity of air travel stimulates the development of tourism infrastructure in destination countries. Tourists require comfortable and safe travel conditions, making the quality of transport services critically important.

The full-scale war in Ukraine has significantly impacted international transport, which is an integral part of the tourism industry. The changes have affected both infrastructure and demand for transport services. At the same time, the crisis has opened new opportunities for tourism development even under challenging conditions.

According to current information, domestic air passenger transportation in Ukraine has not operated since 2022 due to the war. The main modes of transport for passenger travel are rail, road (buses and private

vehicles), and international bus transportation. The main types of passenger transportation in Ukraine (2022–2024) are presented in Table 3.

Table 3 – Main types of passenger transportation in Ukraine (2022–2024)
Таблиця 3 – Основні види пасажирських перевезень в Україні (2022–2024 роки)

Mode of transportation	2023 year	2024 year (forecast)
Rail transport	25 million (domestic) 2 million (international)	25.2 million (domestic) 2.3 million (international)
Bus transportation	8 million international passengers	Restoration of domestic routes
Private transport	20 million people crossed the border in their own vehicles	-

Source: compiled by the authors [11-13].

Ukrzaliznytsia remains the key operator of passenger transportation. An increase in the number of passengers transported has been observed, both domestically and internationally. The launch of new international routes (e.g., Vienna – Chop – Vienna) indicates improvements in international rail connections.

In 2023, more passengers crossed the border by bus than in the pre-war period, indicating growing demand for international bus travel. A significant increase in the number of international carriers (178 new companies) has contributed to the accessibility of bus transportation. Domestic bus routes have not yet recovered to pre-war levels due to military actions.

In 2023, 20 million people crossed the border in their own vehicles, demonstrating the high mobility of the population and the significant role of personal transport during wartime.

Despite the challenges posed by the war, passenger transportation in Ukraine is showing signs of recovery. Rail transport continues to increase its capacity, the bus sector is adapting to international demand, and private vehicles remain an important means of transportation for millions of Ukrainians.

Additional facts:

- In 2023, JSC Ukrzaliznytsia launched a new international route, Vienna – Chop – Vienna.
- Since 2022, 178 new international bus carriers have emerged [12].

Thus, under wartime conditions, the main modes of transport remain rail and bus. Passenger air transportation is not operational.

The prospects for the development of international transportation in tourism include the implementation of new technologies, such as electric vehicles and high-speed railways, which could reduce the negative environmental impact and improve transportation efficiency. Based on the conducted research, we have generated all opportunities, threats, and prospects for the development of international transportation in tourism. For this purpose, experts in the transport and tourism sectors were involved, namely specialists from the National Transport University, Department of Tourism and Management. The expert assessment is presented in Table 5, which includes ranking (1 – least impact, 5 – greatest impact). The ranks are assigned based on the degree of importance and impact on the tourism and transport sectors.

The highest rank (5) was assigned to security threats, particularly shelling and landmine contamination. This is the primary barrier to international tourism, as the risks to tourists' lives are critical. The destruction of tourist sites and the decline in household incomes (rank 4) further complicate the industry's recovery. Without adequate funding, the restoration of transport and tourism infrastructure will be slow. Although some factors received lower rankings (3-4), they remain significant. In other words, the war has led to infrastructure destruction, the loss of traditional markets and logistical routes, resulting in a significant reduction in passenger transport volumes in 2022 [17].

The increase in CO2 emissions and rising competition among transportation modes may hinder the development of environmentally sustainable transport solutions.

Table 4 – Expert opinion on the development of international transport services in tourism

Таблиця 4 – Експертна думка щодо розвитку міжнародних транспортних послуг у сфері туризму

Criteria	Description	Rank (1-5)
CHALLENGES AND OPPORTUNITIES		
Challenges for International Transport in Tourism		
Environmental Issues	The increase in transport volume leads to higher CO2 emissions.	4
Safety	Increased security requirements due to global threats.	5
Competition	Growing competition between different modes of transport.	3
Challenges for International Tourism		
Safety	Ongoing attacks, mined territories, and the risk of assaults deter foreign tourists.	5
Infrastructure Losses	The destruction of hotels, resorts, museums, and natural sites complicates tourism recovery.	4
Economic Difficulties	Declining household incomes and funding shortages hinder tourism development.	4
New Opportunities for Development		
Solidarity Tourism	Foreign visitors travel to support the country by participating in volunteer initiatives or donation tours.	3
Military Tourism	Visiting de-occupied territories and war memorials as a new attraction for international tourists.	4
Business Tourism	Representatives of governmental and non-governmental organizations visit for aid coordination and humanitarian missions.	4
Post-War Prospects		
Infrastructure Reconstruction	Restoring destroyed facilities with international investment.	5
War Tourism Development	Creating war memorials and museums as tourist attractions.	4
Strengthening Cultural Image	Promoting Ukraine's history and traditions on a global scale.	4

Source: Compiled by the Authors

The war has stimulated the emergence of unique tourism segments, such as military tourism and solidarity tourism (rank 3-4). These could become key drivers for attracting international tourists and supporting the economy. The reconstruction of tourism and transport infrastructure (rank 5), the development of war tourism (rank 4), and the strengthening of Ukraine's cultural image (rank 4) create opportunities to shape a new national tourism identity on the global stage.

Based on this study, we propose several recommendations and measures for the further development of tourism:

- Ensuring the security of tourist zones and transport routes should be a top priority.
- Investors should be engaged in rebuilding infrastructure and developing new tourism destinations.
- Niche tourism sectors, such as military and volunteer tourism, should be promoted to attract international attention.
- Efforts should be made to reduce the environmental impact of transport, as this will be a crucial trend in the post-war period.

Thus, despite significant challenges, the prospects for tourism development after the war remain promising, especially with active international support and strategic planning.

Conclusions and recommendations. International transportation in wartime conditions has undergone significant changes, yet at the same time, it has opened new opportunities for tourism development. After victory, Ukraine has every chance to become a model of successful tourism industry recovery through innovative approaches and international support.

International transportation plays a crucial role in the development of the tourism industry by ensuring tourist mobility, contributing to economic growth, and fostering international connections. However, this sector faces numerous challenges and opportunities that must be considered when planning future transport and tourism policies.

The war in Ukraine has significantly impacted international tourism and transportation, restricting access to certain regions. Since 2022, domestic air travel in Ukraine has ceased, leaving rail and road transport as the primary modes of transportation.

The destruction of transport and tourism infrastructure, including airports, hotels, and tourist sites, greatly complicates the industry's recovery process and the return of international tourists.

The war has led to a decline in household incomes, negatively affecting the frequency of tourist trips. Simultaneously, rising transportation costs make international travel more difficult. Increasing competition among different modes of transport, especially in the context of environmental regulations and the adoption of "green" technologies, presents a significant challenge for the transport sector.

Despite these difficulties, the tourism industry and international transportation have growth prospects if innovative solutions and effective policies are implemented. The war has spurred the development of new tourism segments, such as volunteer tourism and visits to de-occupied territories. These could become important avenues for attracting international tourists. The adoption of modern technologies, including high-speed rail and electric transport, will enhance the sustainability and efficiency of international transportation. After the war, international investments can aid in rebuilding transport and tourism infrastructure, facilitating the return of tourist flows. Promoting Ukraine’s historical and cultural heritage on the global stage can help attract tourists and create new opportunities for economic growth.

International transportation remains a critically important factor in tourism development. Despite the challenges Ukraine faces, the prospects for industry recovery remain positive, provided there is effective planning, investment attraction, and the development of modern tourism and transportation strategies.

References

1. Kompanets K.A., Ivanchuk S.I., Bondarenko V.A. Peculiarities of the formation of innovative trends in the tourism sector based on modern consumer needs / // Bulletin of the National Transport University. Series "Economic Sciences". Scientific and Technical Collection. – K.: NTU, 2022. – Issue 1 (50). DOI: 10.33744/2308-6645-2022-2-52-172-180. URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/52/172_180.pdf (access date: 10.01.2025).

2. Tourism Restoration and Tourism for Restoration. URL: https://www.ukrainer.net/turyzm-vidnovlennia/(access date: 10.01.2025).

3. The revival of tourism after the war: what does international experience say and what opportunities are there for Ukraine? URL: https://hub.kyivstar.ua/articles/rinok-mizhnarodnih-avtobusnih-perevezen-v-ukrayini-vikliki-mozhlivosti-dosvid-kompanij

4. Vyhovsky D.S. Trends and prospects for tourism development: Ukraine and the world. Economy. URL: http://bses.in.ua/journals/2024/86_2024/4.pdf(access date: 12.01.2025).

5. Melnyk K. Tourism restores pre-pandemic indicators. Over 1.4 billion people traveled around the world in 2024. URL: https://www.village.com.ua/village/life/edu-news/359227-turizm-vidnovlyue-dopandemichni-pokazniki-ponad-1-4-milyarda-lyudey-podorozhuvali-svitom-u-2024-rotsi(access date: 10.01.2025).

6. Business news from Ukraine URL: https://www.ukr.net/news/details/world/109183082.html(access date: 10.01.2025).

7. Global tourism revenue to reach $15.5 trillion by 2033 – WTTC forecast URL: https://forbes.ua/news/dokhodi-svitovoi-turistichnoi-galuzi-syagnut-155-trln-do-2033-roku-prognoz-wttc-21082023-15527(access date: 11.01.2025).

8. Tourism in Europe has almost reached pre-pandemic levels URL: https://visitukraine.today/uk/blog/3379/tourism-in-europe-has-almost-reached-pre-pandemic-levels-how-many-foreign-tourists-traveled-to-the-region(access date: 11.01.2025).

9. Net income of Ukrainian tourism companies increased by a third in the first half of 2024. YouControl research. URL: https://business.diia.gov.ua/news/chystyi-dokhid-ukrainskykh-turystychnykh-kompanii-zris-na-tretynu-u-pershomu-pivrichchi-2024-roku-doslidzhennia-youcontrol (accessed: 11.01.2025).

10. Ukraine's tourism industry is breaking records in the middle of the war. URL: https://visitukraine.today/uk/blog/4465/ukraines-tourism-industry-is-breaking-records-in-the-middle-of-the-war-how-much-tax-has-been-paid-to-the-budget(accessed: 11.01.2025).

11. In 2024, the state budget received UAH 616 million from the tourism industry. URL: https://www.tourism.gov.ua/blog/u-2024-roci-do-derzhbyudzhetu-vid-turistichnoyi-galuzi-vzhe-nadiyshlo-616-mln-grn(access date: 01/12/2025).

12. Railinsider. URL: https://www.railinsider.com.ua/v-2024-roczi-uz-planuye-perevezty-275-mln-pasazhyriv/(access date: 01/12/2025).

13. In 2023, almost 8 million passengers crossed the border by bus. Ukrinform. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3900726-u-2023-roci-majze-8-miljoniv-pasaziriv-peretnuli-kordon-na-avtobusah.html (access date: 12.01.2025).

14. In 2023, "Ukrzaliznytsia" plans to transport 147 million tons of cargo. URL: https://cfts.org.ua/news/2023/12/21/v_2023_rotsi_ukrzaliznitsya_planue_perevezti_147_mln_tonn_vantazhiv_77598 (access date: 12.01.2025).

15. Kompanets K.A., Gorodetskiy M.Ya., Miska V.G. Strategies of innovative development of hotel business in the context of the Covid pandemic 19. Modern Science . Moderni veda. 2021. No. 3. P.5-17 Issm 2336-498X URL: https://drive.google.com/file/d/15FP6aVr0ZR47iX2USDtRmUl3BoQFKrBq/view (access date: 13.01.2025).

16. Kompanets K.A., Lytvishko L.O., Ilchenko V.Yu. Marketing innovative technologies and business analytics of foreign economic activity in risk management of transport enterprises. Current issues of economic sciences. 2025. No. 7 URL: DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14760573. URL: https://a-economics.com.ua/index.php/home/article/view/186 (access date: 12.01.2025).

МІЖНАРОДНІ ТРАНСПОРТНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ В ТУРИЗМІ

Іванчук Світлана Іванівна, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри туризму, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: lana-50@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-7280-2344

Артемчук Валентина Олександрівна, старший викладач кафедри менеджменту, Національний транспортний університет, Київ, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, artemchuk@ntu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0001-7326-1373

Бондаренко Владислава Анатоліївна, старший викладач, кафедра туризму, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: vladislawa.b@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4712-1662

Борисова Оксана В., кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри туризму, Національний транспортний університет, м.Київ, Україна, e-mail; mariaborysova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6379-0471

Анотація. У цій статті досліджується роль міжнародного транспорту в розвитку туристичного сектору, наголошується на його важливості для забезпечення мобільності туристів, сприяння економічному зростанню та розвитку міжнародного співробітництва. Дослідження визначає ключові проблеми, які перешкоджають ефективному функціонуванню міжнародного транспорту в туризмі, включаючи екологічні проблеми, загрози безпеці, руйнування інфраструктури та зростання операційних витрат. Особлива увага приділяється впливу геополітичних криз, зокрема війни в Україні, на міжнародний транспорт і туризм, а також наступним порушенням глобальних моделей подорожей.

Дослідження аналізує статистичні дані про відновлення міжнародного туризму та транспорту за останні роки, висвітлюючи тенденції авіаційного, залізничного, автомобільного та морського транспорту. Крім того, у статті розглядаються нові форми туризму, такі як військовий та солідарний туризм, які набули актуальності в регіонах, постраждалих від конфлікту. Отримані дані свідчать про те, що майбутній розвиток міжнародного транспорту в туризмі залежить від модернізації інфраструктури, впровадження цифрових і екологічно чистих технологій і коригування стратегічної політики для підвищення глобальної мобільності та стійкості.

Дослідження робить висновок, що, незважаючи на поточні проблеми, сектори туризму та транспорту мають значний потенціал для відновлення та зростання. Інвестиції в розумні транспортні інфраструктури, військовий туризм, екологічні виклики, транспортні інновації.

Перелік посилань

1. Компанець К.А., Іванчук С.І., Бондаренко В.А. Особливості формування інноваційних трендів в туристичній сфері на основі сучасних потреб споживачів / // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Економічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2022. – Вип. 1 (50). DOI: 10.33744/2308-6645-2022-2-52-172-180. URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/52/172_180.pdf (дата звернення: 10.01.2025).

2. Відновлення туризму і туризм для відновлення. URL: https://www.ukrainer.net/turyzm-vidnovlennia/(дата звернення: 10.01.2025).

3. Відродження туризму після війни: про що каже міжнародний досвід та які можливості є для України? URL: https://hub.kyivstar.ua/articles/rinok-mizhnarodnih-avtobusnih-perevezen-v-ukrayini-vikliki-mozhlivosti-dosvid-kompanij

4. Виговський Д.С. Тенденції та перспективи розвитку туризму: Україна та світ. Економіка. URL: http://bses.in.ua/journals/2024/86_2024/4.pdf(дата звернення: 12.01.2025).

5. Мельнік К. Туризм відновлює допандемічні показники. Понад 1,4 мільярда людей подорожували світом у 2024 році. URL: https://www.village.com.ua/village/life/edu-news/359227-turizm-vidnovlyue-dopandemichni-pokazniki-ponad-1-4-milyarda-lyudey-podorozhuvali-svitom-u-2024-rotsi(дата звернення: 10.01.2025).

6. Business news from Ukraine URL: https://www.ukr.net/news/details/world/109183082.html(дата звернення: 10.01.2025).

7. Доходи світової туристичної галузі сягнуть $15,5 трлн до 2033 року – прогноз WTTC URL: https://forbes.ua/news/dokhodi-svitovoi-turistichnoi-galuzi-syagnut-155-trln-do-2033-roku-prognoz-wttc-21082023-15527(дата звернення: 11.01.2025).

8. Туризм в Європі майже вийшов на допандемійні рівні URL: https://visitukraine.today/uk/blog/3379/tourism-in-europe-has-almost-reached-pre-pandemic-levels-how-many-foreign-tourists-traveled-to-the-region(дата звернення: 11.01.2025).

9. Чистий дохід українських туристичних компаній зріс на третину у першому півріччі 2024 року. Дослідження YouControl. URL: https://business.diia.gov.ua/news/chystyi-dokhid-ukrainskykh-turystychnykh-kompanii-zris-na-tretynu-u-pershomu-pivrichchi-2024-roku-doslidzhennia-youcontrol (дата звернення: 11.01.2025).

10. Туристична галузь України є рекордсменом посеред війни. URL: https://visitukraine.today/uk/blog/4465/ukraines-tourism-industry-is-breaking-records-in-the-middle-of-the-war-how-much-tax-has-been-paid-to-the-budget(дата звернення: 11.01.2025).

11. У 2024 році до держбюджету від туристичної галузі вже надійшло 616 млн грн.. URL: https://www.tourism.gov.ua/blog/u-2024-roci-do-derzhbyudzhetu-vid-turistichnoyi-galuzi-vzhe-nadiyshlo-616-mln-grn(дата звернення: 12.01.2025).

12. Railinsider. URL: https://www.railinsider.com.ua/v-2024-roczi-uz-planuye-perevezty-275-mln-pasazhyriv/(дата звернення: 12.01.2025).

13. У 2023 році майже 8 мільйонів пасажирів перетнули кордон на автобусах. Укрінформ. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3900726-u-2023-roci-majze-8-miljoniv-pasaziriv-peretnuli-kordon-na-avtobusah.html (дата звернення: 12.01.2025).

14. В 2023 році "Укрзалізниця" планує перевезти 147 млн тонн вантажів. URL: https://cfts.org.ua/news/2023/12/21/v_2023_rotsi_ukrzaliznitsya_planue_perevezti_147_mln_tonn_vantazhiv_77598 (дата звернення: 12.01.2025).

15. Компанець К.А.,Городецькій М.Я,. Міска В.Г. Strategies of innovative development of hotel business in the convention of the Covid pandemic 19. Modern Science . Moderni veda. 2021. № 3. P.5-17 Issm 2336-498X URL: https://drive.google.com/file/d/15FP6aVr0ZR47iX2USDtRmUl3BoQFKrBq/view (дата звернення: 13.01.2025).

16. Компанець К.А., Литвишко Л.О., Ільченко В.Ю. Маркетингові інноваційні технології та бізнес-аналітика ЗЕД в управлінні ризиками транспортних підприємств. Актуальні питання економічних наук. 2025. №7 URL: DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14760573. URL: https://a-economics.com.ua/index.php/home/article/view/186 (дата звернення: 12.01.2025)

УДК 656.1/.5
UDC 656.1/.5
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-458-474

ТЕНДЕНЦІЇ ВИБОРУ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ ПРИ ВРАХУВАННІ ЕКОНОМІЧНИХ МЕЖ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В ПІДПРИЄМНИЦЬКІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

TRENDS IN CHOOSING MANAGEMENT SOLUTIONS WHEN TAKING INTO ACCOUNT THE ECONOMIC LIMITS OF THE APPLICATION OF ELECTRIC VEHICLES IN BUSINESS ACTIVITIES



***Порфіренко Володимир Іванович**, кандидат економічних наук, доцент,Національний транспортний університет, доцент кафедри менеджменту, e-mail: porfirenko@gmail.com, тел. +380 67 5034433, Україна, 01010, м. Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, к. 242.*

https://orcid.org/0000-0003-0329-6217



***Луговцов Антон Сергійович**, студент, Національний транспортний університет, e-mail: lugovcovanton9@gmail.com, тел. +380 68 327 3691, Україна, 01010, м. Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, к. 242.*
https://orcid.org/0009-0004-1342-706X

Анотація. Стаття присвячена дослідженню тенденцій вибору управлінських рішень при врахуванні економічних меж застосування електромобілів в підприємницькій діяльності. Електромобілі на сьогоднішній день набули значного розвитку і поширення. Віднедавна на ринку почали з'являтися електровантажівки, електробуси, а також значного поширення набули різні електромобілі. В цих умовах підприємці стають перед нелегким вибором: оновити свій автопарк новими електромобілями чи класичними, перевіреними часом автомобілями з ДВЗ (Двигуном внутрішнього згоряння). Електромобілі відкривають нові можливості для зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище, зменшення експлуатаційних витрат і покращення якості повітря. Водночас існують певні виклики і нюанси, які потребують уваги при переході до електромобілів на міжнародних, міжміських і міських маршрутах.

Об'єкт дослідження – економічна доцільність використання електромобілів у підприємницькій діяльності.

Мета роботи – дослідження впливу електромобілів на навколишнє середовище та обгрунтування економічної доцільності їх використання в підприємницькій діяльності.

Методи дослідження – статистичні та порівняльні методи.

Проведено аналіз основних переваг і недоліків електромобілів порівняно з автомобілями з ДВЗ. Проведено порівняння екологічного впливу обох видів автомобілів на навколишнє середовище. Проведено аналіз програм стимулювання купівлі електромобілів в Україні та світі. Проведено обгрунтування економічної доцільність використання електромобілів для підприємницької діяльності.

Ключові слова: електромобілі, ДВЗ, екологічність, електробуси, електровантажівки, економічна доцільність, акумуляторні батареї, витрати, підприємництво, управлінське рішення, доцільність експлуатації електромобілів.

Постановка проблеми

На сьогоднішній день електромобілі набувають все більшої актуальності в Україні та світі. Їх вибір обумовлений не лише екологічністю, а й економічною вигодою, особливо у порівнянні з традиційними авто на бензині чи дизелі. При виборі будь-якого електромобіля споживачі враховують не тільки його вартість, а й витрати на подальшу експлуатацію, зокрема зарядку. Однак на відміну від звичайних споживачів підприємці при виборі електромобіля, електровантажівки чи електробусу ставлять на меті одержання прибутку від вкладеної інвестиції (придбання авто). Станом на 2025 рік підприємці для перевезень по місту, між містами, по Україні, за кордон використовують автомобілі з ДВЗ. Дані автомобілі добре себе зарекомендували серед підприємств-виробників, перевізників вантажів, перевізників пасажирів, експортерів і імпортерів продукції. Тому, щоб зіставити їм конкуренцію, електромобіль має бути економічно вигідним для даних підприємств і бізнес-процесів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Історія автомобільного транспорту почалася наприкінці XIX століття із появою перших автомобілів на бензинових та дизельних двигунах. У 1886 році Карл Бенц створив перший бензиновий автомобіль, а вже у 1893 році Рудольф Дизель запатентував дизельний двигун. Із появою бензинових та дизельних двигунів почався стрімкий розвиток автомобільного транспорту та транспортної інфраструктури.

Згодом підприємці, автомеханіки та дослідники дійшли до висновку, що дизельні і бензинові двигуни можна застосовувати не лише у легкових автомобілях, а й у спеціально обладнаних для перевезення вантажів, а згодом і пасажирів. Довгий час вантажні автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння залишалися основним інструментом бізнесу. Однак, згодом вчені та дослідники з'ясували, що автомобілі з ДВЗ, зокрема вантажні автомобілі та автобуси, є значним джерелом забруднення довкілля. Особливо це стосується великих міст-мегаполісів і місць з великим скупченням транспорту, наприклад, на перехрестях і біля світлофорів. Для мінімізації негативного впливу автотранспортних засобів, оснащених ДВЗ, виробники почали впроваджувати новітні екологічні стандарти транспорту (Євро-3,4, Євро-5,6 тощо), які завдають менше шкоди навколишньому середовищу. Проте навіть після цих заходів їх негативний вплив повністю не зник, хоча значно скоротився.

Сьогодні, на тлі розвитку електротранспорту, підприємці отримали альтернативу — електромобілі. Дослідження протягом багатьох років підтвердили позитивний вплив електромобілів на навколишнє середовище. Згідно з наявними дослідженнями, протягом усього життєвого циклу транспортних засобів, саме фаза експлуатації пов'язана з найбільшим забрудненням навколишнього середовища. У цьому відношенні електромобілі перевершують інші моделі автомобілів, серед іншого, створюючи значно менший вуглецевий слід.

У найбільш розвинених країнах ЄС, де відсоток виробництва енергії з відновлюваних джерел є найвищим, електромобіль генерує на 50% менше CO_2 протягом свого терміну служби (включаючи весь життєвий цикл з виробництвом та утилізацією АКБ) впорівняно з дизельним автомобілем. Для порівняння, у Польщі електромобілі викидають в середньому на 25% менше вуглекислого газу, ніж дизельні, за весь життєвий цикл [1].

Варто зазначити, що цього про електромобілі не можна сказати коли мова йде про виготовлення акумуляторів і утилізацію при їх заміні. Однак компанії намагаються вирішити дану проблему. Дослідження показали, що деякі елементи акумуляторів і батарей можна використовувати повторно. Приклад подає компанія Tesla, яка заявляє, що жодна з пошкоджених або вичерпаних батарей, які використовуються в її транспортних засобах, не відправляється на звалище, і що ефективна переробка дозволяє відновити до 92% компонентів [1,2]. Завдяки цьому заходу, більшість акумуляторів не потрапляють на звалище, успішно переробляються та використовуються повторно, що значно зменшує негативний вплив на навколишнє середовище, насамперед забруднення відходами та шкідливими елементами батарей і акумуляторів.

Автомобілі, які обладнані двигуном внутрішнього згоряння, викидають значні обсяги CO2, які негативно впливають на навколишнє середовище, особливо у великих містах на перехрестях. Сучасні виробники автомобілів з ДВЗ експериментують з паливом і двигунами, щоб зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Результат від цих дій є - наприклад, двигуни, які заправляються дизелем, зменшили кількість шкідливих викидів і стали більш екологічними ніж бензинові, але варто розуміти, що шкідливі викиди нікуди не зникли.

Подібна ситуація спостерігається і з гібридними автомобілями. Вони є більш екологічно чистими, ніж автомобілі з ДВЗ, оскільки, крім двигуна внутрішнього згорання, оснащені ще й електродвигуном. Однак коли батарея такого гібрида розрядиться, він зможе продовжувати рух на бензині або дизелі. Зазвичай у таких автомобілях встановлюють малопотужні двигуни, які викидають менше шкідливих речовин на 100 км, ніж бензинові і дизельні. Таким чином, для навколишнього середовища вони будуть більш екологічно чистими, хоча не повністю екологічними.

Підігріває інтерес підприємців до електромобілів і рішення Європейського Союзу, затверджене 14 лютого 2023 року, згідно з яким Європейський парламент (ЄП), остаточно схвалив заборону на продаж нових автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння (бензиновими, дизельними та іншими) на території Європейського Союзу з 2035 року [3]. Основною метою цього рішення і «зелених» планів ЄС – скорочення викидів парникових газів на 55% до 2030 року.

На сьогоднішній день на ринку можна зустріти досить багато різноманітних легкових електромобілів. Однак для підприємців найбільш цікавою і суперечливою стала новина про появу електробусів та електровантажівок. Виробники електровантажівок та електробусів обіцяють зниження експлуатаційних витрат і менший негативний вплив на навколишнє середовище. У цих умовах перед підприємцями постає важливе питання: чи варто оновлювати автопарки за рахунок нових автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння, чи краще інвестувати в електромобілі.

За своєю конструкцією електромобілі майже не відрізняються від бензинових, газових або дизельних автівок. Колеса, підвіска, кермо, педалі — все це так само є в електромобілях. Основна відмінність — замість двигуна внутрішнього згоряння в електрокарі встановлено електричний двигун, а джерелом його живлення служить батарея (рис. 1).

Більшість електромобілів коштують дорожче за бензинові авто через високу вартість батарей. Наприклад, за даними ECOFACTOR [4] середньостатистичний новий електрокар у 2025 році коштує від 30 000 до 50 000 доларів, тоді як бензиновий аналог можна придбати від 20 000 до 40 000 доларів. За цими цінами переважно зустрічаються легкові електромобілі, однак ще можуть зустрічатися нові електровантажівки з вантажопід'ємністю до 3 тон. Вартість електровантажівок понад 11 тон, а також електробусів і фур, значно вища, однак навіть так вони є дорожчими за класичні варіанти з ДВЗ.

Не варто забувати і про вторинний ринок, тобто ринок вживаних автомобілів. На ньому можна купити електромобілі значно дешевше, ніж нові варіанти. Вартість такого електромобіля залежить від його року випуску, пробігу, стану батареї, стану транспортного засобу тощо. На такому ринку вартість більшості дизельних вантажівок і електровантажівок прирівнюється, хоча деякі дизельні вантажівки вартують навіть дорожче.

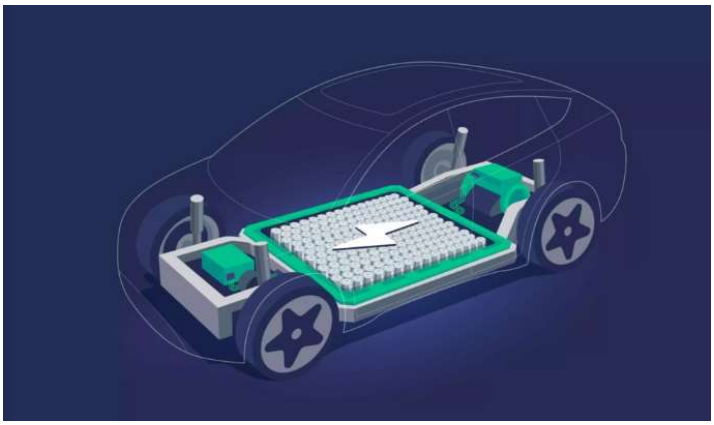


Рисунок 1 **–** Конструкція електромобіля
Figure 1 **–** Electric vehicle design

Для стимулювання переходу на електромобілі в Європі та світі передбачені стимули для заохочення переходу на електротранспорт. До їхнього переліку входять субсидії та податкові пільги, наприклад, звільнення від реєстраційних зборів або зниження ставок податків на транспортні засоби, безкоштовний або пільговий доступ до паркувальних місць у великих містах та знижені тарифи на зарядку в громадських місцях або домашніх умовах.

Наприклад [5]:

- В Австрії для стимулювання продажів електрокарів надають їх власникам можливість безкоштовного паркування, дозволяють їздити смугами для громадського транспорту, а також надають можливість їздити трасою з більшою швидкістю, ніж автомобілі з ДВЗ;
- В США покупцям електрокарів у свій час поверталося до 25% їх вартості. А в Китаї – до 35%. У деяких країнах Євросоюзу, наприклад, у Португалії, Іспанії та Франції, при купівлі електромобіля видавалася державна субсидія від 5 до 7 тис. євро;
- Естонія надає покупцям грант у розмірі 5 000 євро на покупку електромобіля.

Норвегія стала зразком переходу на електромобілі [6]. У 2024 році, згідно з офіційною статистикою, майже дев'ять із 10 проданих у країні автомобілів були на електричній тязі. За інформацією Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), у 2023 році - останньому, за який є дані, - загалом у світі частка електромобілів у загальному обсязі реалізованих авто становила лише 18 відсотків.

Норвезька влада взяла на себе значні зобов'язання щодо боротьби зі зміною клімату завдяки сильній державній політиці, розвиненій інфраструктурі та підтримці громадськості. Мета Осло – досягти нульових викидів для всіх нових легкових автомобілів, що продаються в країні до кінця 2025 року, що на десятиліття випереджає відповідний цільовий термін Європейського Союзу, до якого Норвегія не входить.

Суттєву роль у стимулюванні цього переходу відіграла сприятлива державна політика. Норвегія звільнила електромобілі від сплати ПДВ та імпортних мит, які можуть становити від третини до майже половини їхньої вартості. Власники електрокарів також користувалися пільгами на платних дорогах, безкоштовним паркуванням, а в районі Осло навіть могли використовувати смуги для громадського транспорту. Спочатку ці податкові пільги принесли найбільшу вигоду заможним норвежцям, для яких електрокар часто ставав другою машиною в родині.

Майже досягнувши мети щодо повного переходу на електромобілі до 2025 року, уряд нещодавно скасував деякі з перелічених стимулів. Тепер ПДВ частково стягується під час продажу великих і розкішних машин вартістю понад 500 тисяч крон (42 500 євро в перерахунку). При цьому власники електромобілів, що належать до малозабезпечених верств населення, як і раніше, отримують вигоду з численних пільг, а також від зниження цін на такі авто.

Тим часом інші країни, зокрема Німеччину, звинувачують у тому, що вони, скорочуючи субсидії на купівлю нових електромобілів, відходять від цілей щодо пом'якшення наслідків зміни клімату задовго до досягнення затверджених показників.

Федеральне автотранспортне відомство (Kraftfahrt-Bundesamt, KBA) повідомило, що в 2024 році в Німеччині, найбільшому автомобільному ринку Європи, було зареєстровано електромобілів на 27,4 відсотка менше, ніж на рік раніше. Аналітики кажуть, що Берліну доведеться переглянути рішення про зниження субсидій при придбанні таких машин, якщо Німеччина, великий їхній виробник, має намір досягти своєї мети - мати на своїх дорогах до 2030 року 15 мільйонів авто на електричній тязі.

В Україні також передбачені програми та податкові стимули на придбання електрокарів [5,7]. Вони включають:

- звільнення від сплати ПДВ (податку на додану вартість);
- відсутність акцизного збору;
- відсутність ввізного імпортного мита;
- знижені збори на реєстрацію – власники електромобілів сплачують менші реєстраційні збори у порівнянні з авто з двигунами внутрішнього згоряння;
- пільги на паркування – у деяких містах, таких як Київ і Львів, передбачені безкоштовні місця для паркування електромобілів;
- власники електромобілів можуть використовувати смуги громадського транспорту;
- компенсації для юридичних осіб – деякі програми пропонують пільги для підприємств, які інвестують в електромобілі або зарядні станції.

Вартість ремонту і технічного обслуговування електромобілів і автомобілів з ДВЗ є різною і залежить від інтенсивності використання транспортного засобу, манери їзди, та інших параметрів.

Електромобілі, електровантажівки та електробуси не потребують пістійного ремонту і технічного обслуговування. Це пов’язано з тим, що через відсутність двигуна внутрішнього згоряння в електромобіля значно менше рухомих елементів, ніж у автомобілів з ним. Також електромобілі не потребують заміни мастила, свічок запалювання, ременів ГРМ або складної коробки передач.

Основними витратами ТО і ремонту електромобілів такому разі будуть витрати на:

- періодичну заміну гальмівної рідини;
- перевірку ходової частини та охолоджувальної системи батареї;
- можливу заміну батареї після 8-15 років експлуатації або її окремих елементів;
- заміну фільтру салону.

До інших витрат (додаткових) можуть увійти:

- заміна гальмівних колодок (в залежності від інтенсивності використання електромобіля);
- заміна порту зарядки;
- діагностика системи;
- виправлення, які пов’язані з «прошивкою» електромобіля.

За рік обслуговування електромобіля може вартувати від 100-500 доларів за даними джерела ECOFACTOR [4]. Вартість ремонту електромобіля буде, навпаки, вищою, скажімо, якщо вийде з ладу акумулятор, електродвигун або інший важливий елемент – витрати на ремонт такого електромобіля будуть суттєвими. Однак випадки виходу з ладу елементів електромобіля є досить рідкісними, що зменшує вірогідність їхньої появи.

В бензинових/дизельних автомобілів ситуація протилежна. Двигуни внутрішнього згоряння містять багато рухомих частин, які з часом зношуються. Тому вони потребують регулярного обслуговування, яке включає:

- заміну моторного мастила та фільтрів (зазвичай кожні 10 000-15 000 км);
- заміну свічок запалювання;
- заміну ременів ГРМ;
- заміну повітряних фільтрів;
- обслуговування коробки передач.

Таким чином, за рік вартість обслуговування бензинового авто може коштувати близько 500-1500 доларів за даними джерела ECOFACTOR [4].

Орієнтовно обслуговування електромобіля обходиться у 30–50 % дешевше, ніж у традиційних автомобілів, - повідомляє видання День за Днем [8]. Подібну інформацію повідомляють і іноземні видання:

- дослідження Consumer Reports, опубліковане в 2020 році, показує, що витрати на обслуговування електромобілів на 50% менші, ніж у автомобілів з бензиновим двигуном [9];
- Аргонська національна лабораторія провела дослідження, під час якого вони виявили, що технічне обслуговування та ремонт транспортного автобуса EV (Electric Vehicle) коштує на 40% менше, ніж вартість обслуговування автомобіля з двигуном ICE (Internal Combustion Engine) такого ж розміру [10].

Кількість відвідувань станції технічного обслуговування в підприємницькій діяльності електромобіля залежить від інтенсивності його використання конкретним підприємством.

Час заряджання електромобіля не є його сильною стороною. Він залежить від того, яким способом буде заряджатися електромобіль:

- звичайні користувачі можуть заряджати електромобіль вдома, підприємці можуть заряджати електромобілі на підприємстві, встановивши спеціальну зарядну станцію;
- на комерційних станціях постійного (AC-alternate current) і змінного струму (DS-direct current) (рис. 2).

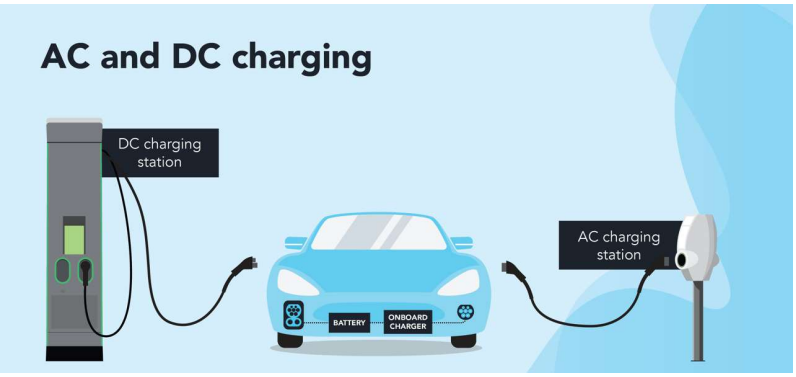


Рисунок 2 – заряджання електромобіля постійним (DC) і змінним (AC) струмом

Figure 2 – charging an electric vehicle with direct (DC) and alternating (AC) current

Тривалість заряджання електромобіля, електровантажівки чи електробусу залежить від потужності зарядного пристрою, ємності акумулятора та умов навколишнього середовища, наприклад, взимку за низької температури або влітку в спекотні дні електромобіль може заряджатися повільніше. В першому випадку це зумовлено тим, що за низької температури навколишнього середовища хімічні реакції всередині літій-іонних акумуляторів сповільнюються і електромобіль витрачає певну кількість енергії на підігрів акумулятора під час заряджання. В другому випадку – перегрів, в спекотні дні акумулятор щоб уникнути критичного перегріву може знизити швидкість заряджання електромобіля. Оптимальною є температура акумулятора від 15 до 25°С.

Заряджання авто домашньою зарядкою або встановленою на підприємстві з ємністю акумулятора від 40 до 60 кВт може тривати від 4 до 8 год - використовуючи повільну зарядку (AC-alternate current) потужністю від 7 до 20 кВт тобто спеціальний зарядний пристрій, або від 8 до 12 годин повільною зарядкою (AC - alternate current) потужністю 220 В (тобто звичайна розетка). Залежно від потужності зарядного пристрою, типу підключення до мережі та ємності акумулятора час на заряджання буде відрізнятись.

На публічних станціях швидкого заряджання (DC - direct current) може знадобитися від 30 хвилин до 1 год, також залежно від потужності зарядної станції та ємності акумулятора електромобіля.

Заправка автомобіля, автобусу чи вантажівки обладнаних ДВЗ займає всього кілька хвилин. Таким чином час простою на зарядних станціях у даних автомобілів є значно нижчим.

Вартість заряджання електромобіля на громадських станціях відрізняється в залежності від оператора та потужності зарядної станції. За даними Інституту досліджень авторинку в Україні станом на травень 2025 року [11] середня вартість заряджання електромобіля повільною зарядкою (AC-alternate current) на АЗС становить 15,15 грн/кВт*год., вартість швидкої зарядки (DC - direct current) в середньому становить 17,82 грн/кВт*год. Проте тарифи на заряджання можуть відрізнятися в залежності від регіону, потужності зарядної станції та місцевих тарифів на електроенергію.

Як зазначалося раніше, електромобіль можна заряджати на підприємстві або у випадку звичайних користувачів – вдома. 31.05.2024 Кабінет Міністрів України постановою №632 затвердив єдиний фіксований тариф на електроенергію для побутових споживачів, відтак з першого травня 2024 року ціна за 1 кВт електроенергії для населення становить 4,32 грн. Для споживачів, які мають багатозональний лічильник, діє нічний тариф (з 23:00 до 7:00), який становить 2,16 грн/кВт*год. Тарифи для підприємців є вищими, орієнтовний тариф становить від 6 грн/кВт*год до 10 грн/кВт*год в залежності від постачальника електроенергії і споживання електроенергії підприємством. Також підприємство може погодивши з постачальником електроенергії встановити двозональний лічильник на підприємстві і отримати нижчі тарифи на електроенергію в нічний час.

Вартість заряджання електромобілів у Європі варіюється залежно від країни, типу зарядної станції, політики держави щодо підтримки електричних транспортних засобів та місцевих тарифів на електроенергію. За даними, які наводить Ecofactor у своєму блозі, [12] в Європі існує кілька способів заряджання електромобіля:

- звичайна домашня зарядка (середній тариф для Європи становить 0,12-0,20 євро);
- швидкі зарядні станції (DC) (середній тариф для Європи становить 0,25-0,50 євро);
- супер швидкі зарядні станції (середній тариф для Європи становить 0,30-0,80 євро).

У країнах, які мають розвинену інфраструктуру та сприятливу політику підтримки електромобілів, ціни на зарядку є відносно низькими, а в країнах з менш сприятливою політикою та меншою кількістю таких станцій – вищими. Наприклад:

- у Норвегії - одній з найбільш розвинених країн у сфері електричного транспорту, яка має велику кількість зарядних станцій вартість зарядки становить від 0,20 до 0,30 євро за кВт*год. Цьому сприяють державні субсидії та низькі тарифи на електроенергію;
- Швеція також є однією з лідерів у впровадженні електротранспорту. Вартість заряджання коливається від 0,25 до 0,35 євро за кВт*год, з урахуванням того, що країна активно використовує гідроелектростанції для генерації енергії;
- ціни на зарядку у Франції коливаються від 0,30 до 0,50 євро за кВт*год, залежно від типу зарядної станції та місцезнаходження. Високі ціни на зарядку можуть бути зумовленими частковою залежністю від атомної енергії, що має вищу вартість у порівнянні з поновлювальними джерелами.

За даними, які наводить Bloomberg [13], вартість швидкої зарядки електромобілів обходиться користувачам електрокарів у Великій Британії в 1.7 рази дорожче, ніж заправка традиційними видами палива – зображено на рисунку 3. При цьому наголошується, що якщо користувач електрокара використовує власні можливості для заряджання машини і заряджає електромобіль вдома або у періоди низької вартості електроенергії, тобто у нічний час, то вартість зарядки коштуватиме йому значно дешевше порівняно з витратами на пальне. Різниця між заправленням паливом і заряджанням енергією може бути вищою і становити до 1 000 $ на рік при використанні швидкої зарядки або, навпаки, меншою до 1200 $ на рік при використанні домашньої зарядки у період низької вартості електроенергії. Така ситуація пов'язана з особливостями державного стимулювання використання біопалива та низькою щільністю інфраструктури швидких зарядних станцій.

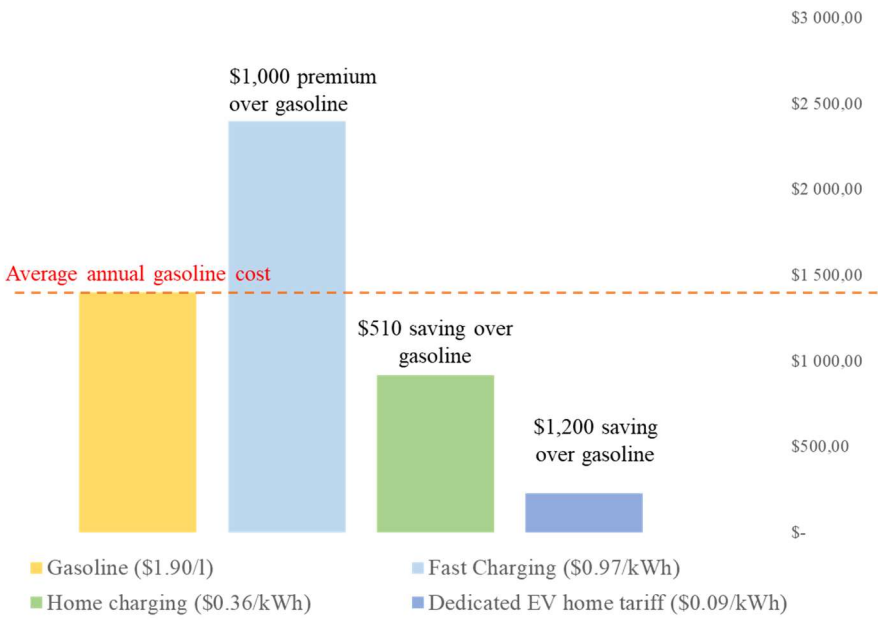


Рисунок 3 – Вартість заряджання АКБ у Великій Британії за даними BloombergNEF [13]

Figure 3 – Charging costs in the UK according to BloombergNEF [13]

Основна частина. Для порівняння вартості володіння електромобілем і автомобілем з ДВЗ було вирішено взяти по одному автомобілю з різними типами двигунів від одного бренду. Основними вимогами які мають бути виконаними при даному порівнянні є:

- однакова кількість кінських сил для бензинового і дизельного варіантів;
- для електромобіля у разі відсутності подібної кількості кінських сил різниця не має перевищувати 6-7%;
- подібний кузов при порівнянні ДВЗ з електромобілем і ідентичний при порівнянні дизельного і бензинового;
- вага дизельного і бензинового автомобілів має бути подібною, вага електромобіля буде відрізнятися, адже через наявність акумулятора електромобілі є важчими ніж авто, які оснащені ДВЗ.

За даними які опубліковані AutoRia [14] та Мінфін [15] середні ціни за провідними операторами на 23.05.2025 становлять: на бензин а 95 – від 54,25 до 57,99 грн/л, на дизель - від 52,35 до 55,99 грн/л. Зважаючи на те, що ціни на паливо для авто оснащених ДВЗ (двигуном внутрішнього згорання) і зарядку для електромобілів різняться в Україні та світі, порівняння проведено з урахуванням ціноутворення у великій мережі автозаправок ОККО.

Примітка: На АЗС «ОККО» послуги заряджання електромобілів надає компанія ТОКА. Вони забезпечують сервісне обслуговування зарядних станцій та процеси платежів через свій мобільний додаток «TOKA NETWORK». Середні тарифи на заряджання електромобілів за даними Інституту досліджень авторинку [11] на станціях змінного струму (AC - alternate current) становлять 14,50 грн 1 кВт*год, постійного струму (DC - direct current) 17,50 грн 1 кВт*год.

Для більш об’єктивного порівняння вартості технічного обслуговування електромобіля, бензинового і дизельного ми звернулися до ШІ (Штучного інтелекту). За його даними орієнтовна вартість технічного обслуговування через 15000 км для електромобіля становить від 1500 до 3500 грн, бензинового та дизельного від 2600 до 6000 грн. У вартість ТО не входять заміна шин, непередбачувані ремонти, повторне технічне обслуговування до наступних 15000 км. Вартість технічного обслуговування автомобілів будуть вищими, наприклад, після подолання авто з ДВЗ 50000 км. В

таблиці 2 наведено орієнтовні ціни на обслуговування компонентів бензинового та дизельного автомобілів, в таблиці 3 наведено орієнтовні ціни на обслуговування компонентів електромобіля. Наведені ціни можуть відрізнятися в залежності від тарифів конкретного СТО, регіону, вартості деталей, їх якості, складності робіт, пробігу автомобіля тощо.

Таблиця 1 – Орієнтовна вартість технічного обслуговування автомобіля оснащеного ДВЗ
Table 1 – Estimated cost of maintenance of a car equipped with an internal combustion engine

	Складова	**Частота**	**Приблизна ціна (грн)**
	Заміна моторного масла + фільтр	кожні 10–15 тис. км	1500–2500
	Паливний фільтр	дизель — частіше	600–1200
	Повітряний фільтр	кожні 15–20 тис. км	300–600
	Салонний фільтр	щороку	200–400
	Свічки запалювання (бензин)	кожні 30–50 тис. км	400–1000
	Сажовий фільтр (дизель) – очищення	1 раз на 50–100 тис.	до 3000
	Турбіна/інжектори – чистка або ремонт	після 100 тис. км	3000–15000
	Ремінь ГРМ або ланцюг	90–150 тис. км	3000–7000
Трансмісійне масло (МКПП/АКПП)	раз на 60–100 тис.	1000–3000	

Таблиця 2 – Орієнтовна вартість технічного обслуговування електромобіля
Table 2 – Estimated cost of electric vehicle maintenance

Складова	**Частота**	**Приблизна ціна (грн)**
Техогляд (огляд гальм, підвіски тощо)	щороку	1000–3000
Гальмівна рідина	раз на 2 роки	600–1200
Салонний фільтр	щороку	200–500
Охолоджувальна рідина для АКБ	раз на 2–5 років	800–1500
АКБ високої напруги (заміна — рідко)	після 8–12 років	>100 000 грн (але зазвичай не входить у планове обслуговування)

Витрати на технічне обслуговування електромобіля на перші 15000 км є меншими за автомобіль з ДВЗ (Двигуном внутрішнього згорання) приблизно на 40%.

(6000-3500)/6000*100= 41,66 %

(2600-1500)/2600*100= 42,30 %

Для порівняння обрано Volkswagen T-Roc [16-17] і електромобіль Volkswagen ID.4 [18].

Дані моделі відносяться до класу кросоверів

Моделі T-Roc оснащені бензиновими (1,0 TSI – 2,0 TSI), дизельними двигунами (1,6 - 2,0 TDI).

Електромобіль Volkswagen ID.4 має різні конфігурації котрі мають різну потужність (від 148 к.с до 300 к.с) і різною ємністю (від 52 кВт до 77 кВт). У порівнянні фігуруватимуть версії з ємністю батареї 77 кВт (204 к.с). Обрана потужність двигунів дизельного і бензинового варіанту – 190 к.с.

Габарити дизельного і бензинового автомобіля ідентичні, електромобіль трохи більший за бензиновий та дизельний варіанти.

Споряджена маса автомобілів: на дизелі - 1293 кг; на бензині – 1293 кг; електромобіля на 77 кВт – близько 2124 кг.

Повна маса автомобілів: на дизелі - 1790 кг; на бензині – 1790 кг; електромобіля на 77 кВт – близько 2660 кг.

Проте, якщо відійти від характеристик, наданих джерелом [16,17] автомобілі оснащені дизельними двигунами зазвичай важчі за бензинові.

Порівняння вартості володіння рухомим складом – придбанням, експлуатацією та ТО і ремонтом, електромобілем і автомобілем з ДВЗ, зображено в табл. 3.

Таблиця 3 – Порівняння Volkswagen T-Roc (Двигун внутрішнього згорання, ДВЗ) / ID.4 (електромобіль)

Table 3 – Comparison of Volkswagen T-Roc (Internal Combustion Engine, ICE) / ID.4 (electric vehicle)

Параметр	Дизель (2,0 TDI)	Бензин (2,0 TSI)	Електро (ID.4)
Витрата на 100 км	6,5 л (змішаний цикл)	6,8 (змішаний цикл)	Від 17 до 22 кВт·год
Ціна пального / кВт·год	55,99 грн/л	57,99 грн/л	14,50 грн/кВт·год (повільна зарядка) 17,50 грн/кВт·год (швидка зарядка) 4,32 грн/кВт·год (денний) 2,16 грн/кВт·год (нічний)
Ємність бака/батареї	50 л	50 л	77 кВт·год
Вартість на 100 км	363,93 грн	394,33 грн	від 246,50 до 319 грн (повільна зарядка AC) від 297,50 до 385 грн (швидка зарядка, DC) від 73,44 до 95,04 грн (домашній денний тариф) від 36,72 до 47,52 грн (домашній нічний)
Вартість повної зарядки/заправлення	2799,50 грн	2899,50 грн	1116,50 грн (AC-повільна зарядка) 1347,50 грн (DC-швидка зарядка) 332,64 грн (Домашня зарядка, денний тариф) 166,32 грн (Домашня зарядка, нічний тариф)
Запас ходу	Понад 700 км	Понад 700 км	522 км
ТО кожні 15 000 км	2600 - 6000 грн	2600 - 6000 грн	1500-3500 грн. Різниця в 41,66% - 42,30%
Типові витрати (гальма, фільтри)	Частіше (сажовий фільтр, масло)	Часто (свічки, масло)	Рідше (майже відсутні фільтри, не треба заміна масла)
Проблеми з часом	ТНВД, сажовий фільтр (DPF)	Турбіна, свічки запалювання	АКБ (після 8-10 років), вартість зарядної станції
Ресурс двигуна	300–400 тис. км	250–300 тис. км	500 тис. км (електродвигун)

Для складання порівняльної діаграми, зображеної на рис. 4, використані максимальні значення вартості палива та максимальне споживання енергії електромобілем на 100 км пробігу.

Таким чином, витрати на заряджання електромобіля на швидких (DC) автозаправних станціях на 100 км пробігу є вищими, ніж у дизельного автомобіля, і наближається до витрат бензинового автомобіля. Вартість заряджання електромобіля за домашніми (денним та нічним) тарифами, навпаки, значно нижча.

Витрати на повне заряджання електромобіля відрізняються залежно від ємності акумулятора електромобіля та потужності зарядного пристрою. Порівняння витрат на повне заряджання та заправлення автомобілів зображено на рис.5.

Проведений аналіз показав, що вартість заряджання електромобіля на публічних зарядних станціях постійного струму (DC) може наближатися до вартості бензину та бути вищими за вартість дизелю на 100 км пробігу автомобілів. Дані результати залежать від режиму використання електромобіля. При економному використанні (15 - 17 кВт) електромобіль має нижчі витрати на 100 км пробігу, ніж бензиновий і дизельний варіанти при будь-якому виді заряджання. При неекономному використанні електромобіля (20-22 кВт) вартість заряджання електромобіля може бути вищою, ніж у дизельного автомобіля, і на 9,33 грн нижчими від бензинового варіанту на 100 км пробігу (на швидкій зарядці).

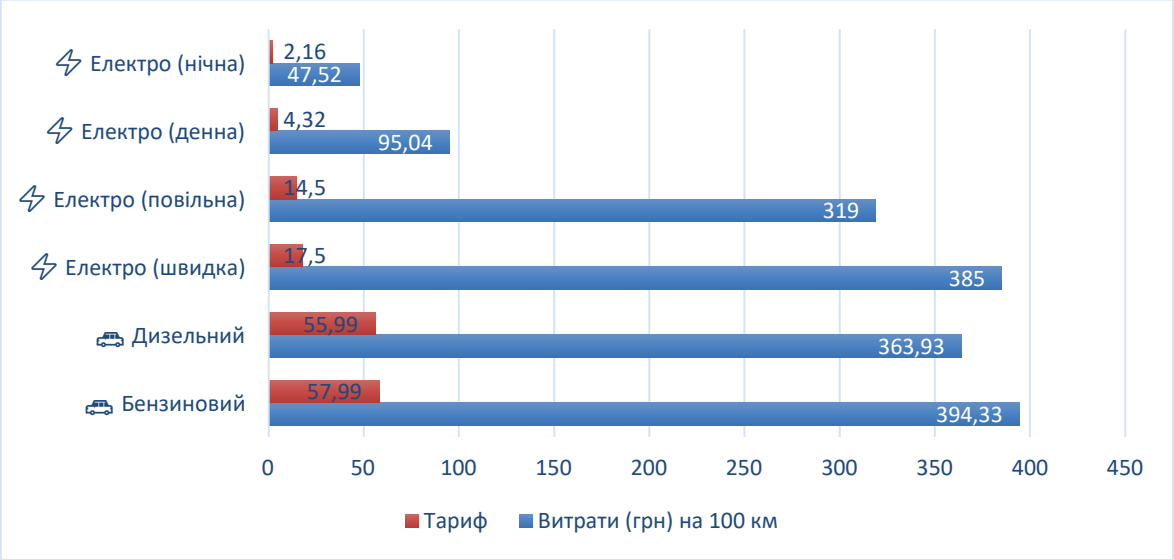


Рисунок 4 **–** Порівняння витрат на паливо та зарядку АКБ, що витрачаються на 100 км пробігу
Figure 4 **–** Comparison of fuel and battery charging costs per 100 km of mileage

Найбільш економним є заряджання електромобіля для звичайних користувачів вдома або для підприємців на підприємстві. Особливо це стосується нічних тарифів на електроенергію, коли ціни знижуються вполовину.

Вартість повного заряджання залишається значно нижчою у електромобіля порівняно з ДВЗ. Однак, навіть електромобіль, обладнаний батареєю ємністю 82 кВт, має значно менший запас ходу, ніж бензиновий та дизельний варіанти (550 км проти понад 700 - 800км залежно від моделі і споживання пального).

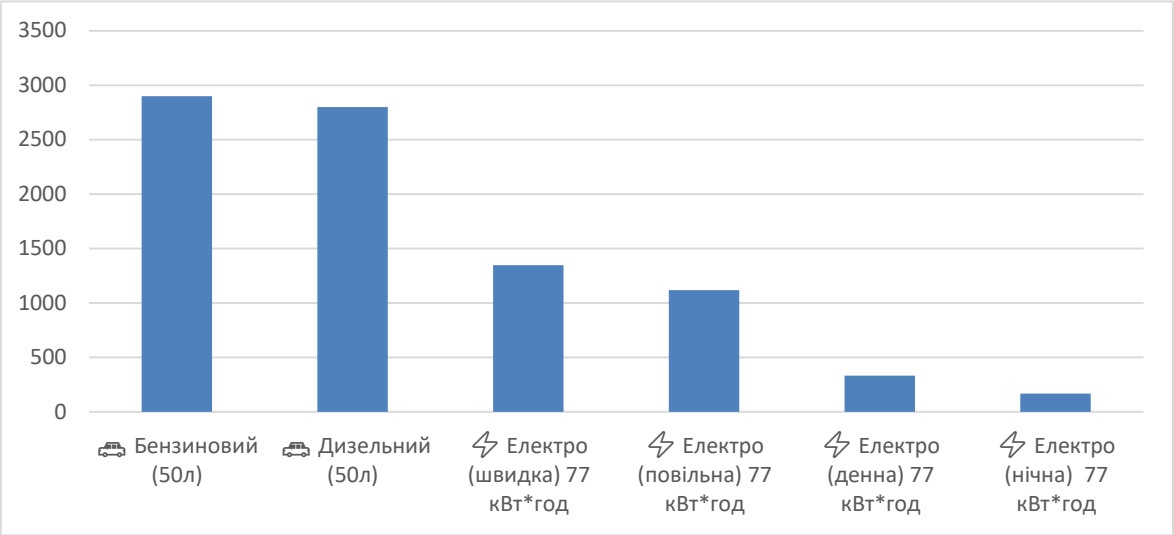


Рисунок 5 – Порівняльні витрати на повне заряджання електромобіля і автомобілів з ДВЗ

Figure 5 – Comparative costs for fully charging an electric vehicle and cars with internal combustion engines

Електровантажівки і електробуси зазвичай мають запас ходу від 200 до 350 км. Обмежений запас ходу робить електромобілі вузькоспеціалізованими транспортними засобами на автотранспортних підприємствах. Підприємство, яке спеціалізується на перевезеннях чи доставці товарів в межах міста або між містами, придбавши електромобіль (для таксування) чи електровантажівку (для перевезень вантажів), зможе значно економити на паливі, встановивши зарядні станції на підприємстві (наприклад, в місцях завантаження-розвантаження) та технічному обслуговуванні транспортних засобів. Час простою електромобіля (час очікування клієнта або замовлення) для таких підприємств може бути можливістю дозарядити або зарядити електромобіль чи електровантажівку перед виїздом.

Компанії, які здійснюють перевезення на великі відстані або регулярні перевезення, не зможуть відчути в повній мірі дані переваги. Зокрема, це пов'язано з часом заряджання електромобіля. Наприклад, при перевезеннях пасажирів до Німеччини чи Польщі, електробус доведеться заряджати кілька разів. Швидка зарядка зарядить електробус орієнтовно за годину, однак витрати можуть бути значними, а повільна комерційна зарядка - за 4-6 годин (залежно від акумулятора та типу підключення). Довгий час зарядки може викликати невдоволення пасажирів і зіпсувати довіру та інтерес до компанії.

Також до даної проблеми додається недостатньо розвинена інфраструктура зарядних станцій. До 2025 року вона значно розширилась, з'явилося багато нових зарядних станцій, проте у малих містах, на міжміських та міжнародних трасах кількість зарядних станцій є невеликою, що вимагає ретельного планування маршруту електробусів.

У випадку перевезень по місту довгий час зарядки можна компенсувати за рахунок добре спланованого графіку руху електробусів з урахуванням часу заряджання.

Для подолання проблеми із довгим часом заряджання електромобілів можна використати модульний принцип заміни акумуляторних батарей. Принцип використання модульних акумуляторів не є новим і знайшов відображення в роботах авторів [19,20]. Дослідники пропонують підприємствам-виробникам зробити акумулятори електромобілів змінними. В залежності від ємності акумулятора електромобіля, буде встановлюватись різна кількість секцій. Наприклад, для авто з ємності від 60 кВт це може бути 1 батарейний блок (модуль), для авто з ємністю 120 кВт - 2 батарейні блоки (модулі).

Чим більша ємність акумуляторів, тим більше модулів буде потрібно. Час заміни даних модулів може становити від 10 до 15 хвилин.

Даний метод дозволить зменшити час простою електромобілів, електровантажівок та електробусів на зарядних станціях, і дозволить здійснювати перевезення на значно більші відстані і при цьому економити на перевезеннях.

Даний метод є цілком реальним і в Україні вже є вантажівка, яка використовує даний принцип заміни акумулятора. 30 квітня 2025 в Україну прибув перший електричний тягач, як пише інформаційно-аналітична група Auto-Consulting. Перша електрична вантажівка являє собою тривісний сідельний тягач із Китаю спорядженою масою 12,4-12,8 тони. Зовні машина мало відрізняється від дизельних аналогів і не настільки футуристична, як, наприклад, вантажний електромобіль Tesla Semi. Однак її особливістю є можливість швидкої заміни акумулятора за п'ять хвилин [21]. Ця подія підтверджує, що модульний принцип заміни акумуляторів електромобілів, електровантажівок та електробусів, можливий і його можна реалізувати для підвищення ефективності і дальності перевезень.

В підсумку наведемо основні переваги і недоліки електромобілів перед класичними з ДВЗ :

- **економічність.** Електромобілі дозволяють економити на зарядці і технічному обслуговуванні за рахунок дешевої електроенергії, а також нижчої вартості обслуговування двигуна й трансмісії;
- **екологічність.** Насамперед мова йде про відсутність викидів вихлопних газів;
- **низький рівень шуму.** Дана перевага особливо актуальна в мегаполісах із великою кількістю транспорту;
- **краща динаміка.** Максимальний крутний момент досягається з перших оборотів;
- **безпека.** Центр ваги автомобіля зміщено вниз, тому електрокари рідше перевертаються і краще поводяться під час різких маневрів;
- **інфраструктура зарядних станцій**. У 2025 році в Україні кількість зарядних станцій значно зросла, особливо у великих містах і на основних магістралях.

Недоліками електромобіля є:

- **обмежений запас ходу.** Зазвичай на одній зарядці електровантажівки та електробуси можуть проїхати від 150 до 350 км. Виняток – середні легкові електромобілі та преміальні моделі Tesla, Jaguar та інші;
- **висока ціна.** Вартість електрокарів у півтора-два рази вища, ніж у більшості класичних автомобілів середнього класу;
- **чутливість до температури повітря.** Електромобілі чутливі до екстремальних температур. У холодну погоду запас ходу може знижуватися на 20–30 %, що особливо важливо враховувати для регіонів із суворими зимами;
- **проблеми з мікрокліматом у салоні.** Кондиціонер працює від батареї, що зменшує запас заряду приблизно на 20 %. Можна, звичайно ж, встановити автономний обігрівач, але це стане джерелом додаткових витрат;
- **слабка інфраструктура зарядних пристроїв.** Хоча вона активно розвивається, однак вона ще недостатньо розвинена у невеликих містах і у віддалених регіонах України, що може ускладнити процес перевезень;
- **довгий час заряджання.** Для досягнення повної ємності акумулятора може знадобитися від 4 до 12 годин на повільних зарядних станціях (АС). Це потребує завчасного планування поїздки з урахуванням тимчасових витрат.

Висновок. Електромобілі не завжди є економічно вигідними для підприємств і бізнес-процесів. Початкові капіталовкладення на купівлю електромобілів і зарядних станцій для підприємств є значно вищими, ніж при купівлі класичних автомобілів на дизелі. При врахуванні капітальних вкладень на купівлю нового або вживаного електромобіля наразі є актуальним і важливим для збереження довкілля, щоби умовно первісна вартість електромобіля дорівнювала вартості аналогічного авто з ДВЗ,

за рахунок дотацій держави, субсидій, субвенцій та Європейських програм підтримки електротранспорту, які спрямовані на розвиток електротранспорту та зниження шкідливих викидів в атмосферу.

Електромобілі дозволять підприємцям економити на вартості палива та технічному обслуговування транспортних засобів, і зменшити шкідливий вплив на навколишнє середовище за рахунок нульових викидів шкідливих речовин.

Впровадження модульного принципу заміни акумуляторів електромобілів дозволить зменшити їх час простою на зарядній станції і здійснювати перевезення на значно більші відстані, при цьому знижуючи експлуатаційні витрати на зарядку. Проте країнам при переході на електромобілі з модульним принципом заміни акумуляторів, варто зосередитись на розвитку технологій з перероблення або повторного використання елементів акумуляторів, які втратили свою ємність або були замінені через інші проблеми з ними, щоб уникнути забруднення навколишнього середовища відпрацьованими акумуляторами електромобілів.

Перелік посилань

1. Чи екологічні електромобілі? URL: https://www.products.pcc.eu/uk/blog/%D1%87%D0%B8-%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%87%D0%BD%D1%96-%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D1%96%D0%BB%D1%96/#przypis3
2. Tesla стверджує, що тепер може переробляти 92% матеріалів акумуляторних елементів. URL: https://www.deassociation.ca/newsfeed/tesla-says-it-can-now-recycle-92-of-battery-cell-materials
3. У ЄС заборонили продаж автомобілів на бензині з 2035 року. URL: https://www.dw.com/uk/u-es-ne-prodavatimut-avtomobili-na-benzini-ta-dizeli-z-2035-roku/a-64703152
4. ECOFACTOR Що краще: електромобіль чи бензиновий автомобіль? URL: https://ecofactortech.com/ua/what-is-better-an-electric-car-or-gasoline/
5. Пільги та нововведення для електромобілів. URL: https://ncars.com.ua/media/pilgy-ta-novovvedennia-dlia-elektromobiliv/
6. Секрет успіху: як Норвегія перейшла на електромобілі. URL: https://www.dw.com/uk/sekret-uspihu-ak-norvegia-perejsla-na-elektromobili/a-71254467
7. Державні пільги та програми для власників електромобілів в Україні у 2025 році. URL: https://x-auto.com.ua/derzhavni-pilhy-ta-prohramy-dlya-vlasnykiv-elektromobiliv-v-ukraini-u-2025-rotsi/
8. День за днем. Вигідно чи ні купувати електромобіль у 2025 році: розбираємося в деталях. URL: https://denzadnem.com.ua/blogy/korysni-porady/199652
9. Дослідження Consumer Reports показує, що витрати на обслуговування електромобілів на 50% менші, ніж у автомобілів з бензиновим двигуном. URL: https://betterenergy.org/blog/consumer-reports-study-finds-electric-vehicle-maintenance-costs-are-50-less-than-gas-powered-cars/?utm_source=chatgpt.com
10. Витрати на технічне обслуговування електромобілів порівняно з автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння. URL: https://www.driveelectrictn.org/maintenance-costs-for-evs-vs-ice-vehicles/?utm_source=chatgpt.com
11. Скільки коштує зарядити електромобіль у травні 2025 року? URL: https://eauto.org.ua/news/807-skilki-koshtuye-zaryaditi-elektromobil-u-travni-2025-roku
12. Вартість зарядки електромобіля в Європі: що варто знати? URL: https://ecofactortech.com/ua/how-much-does-it-cost-to-charge-an-electric-car-in-europe/

13. Скільки коштує зарядити електромобіль. URL: https://www.bloomberg.com/news/newsletters/2024-10-10/how-much-does-it-cost-to-charge-an-electric-car-it-s-complicated?srnd=undefined
14. Середні ціни на паливо в Україні за даними AutoRia. URL: https://auto.ria.com/uk/toplivo/a95/
15. Середні ціни на паливо в Україні за даними Мінфін. URL: https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/tm/
16. Volkswagen T-Roc 2.0 TDI (190 л.с.) 7-DSG 4x4. URL: https://volkswagen-t-roc.infocar.ua/mod_14283_t-roc_id5336.html
17. Volkswagen T-Roc 2.0 TSI (190 л.с.) 7-DSG 4x4. URL: https://volkswagen-t-roc.infocar.ua/mod_10724_t-roc_id5336.html
18. Volkswagen ID.4 150 kW (77 kWh) (204 л.с). URL: https://volkswagen-id-4.infocar.ua/mod_15376_id-4_id6279.html
19. Порфіренко В.І. Інноваційний модульний розвиток мережі електробусних пасажирських перевезень в мегаполісах: « Інноваційний розвиток транспортного комплексу: монографія / За загал. редакцією проф. Ложачевської О.М. Київ: Міленіум, 2021. С. 130-140.
20. Порфіренко В.І., Кудін Є. Р., Міжнародні перевезення електромобілями: переваги застосування модульного принципу секційного випуску та заміни акумуляторних батарей. Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», 2024. Випуск 116. Частина 1. ISSN 0365-8171 (Print), ISSN 2707-4080 (Online), ISSN 2707-4099 (CD), http://addb.ntu.edu.ua. Scientific journal «AUTOMOBILE ROADS AND ROAD CONSTRUCTION», 2024. Issue 116. Part 1. C.294. https://DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.1-294-313
21. В Україну прибув перший електричний тягач: на що здатен такий вантажний автомобіль. URL: https://blik.ua/automobile/4154-v-ukrayinu-pribuv-pershii-elektrichnii-tyagach-na-sho-zdaten-takii-vantazhnii-avtomobil

TRENDS IN CHOOSING MANAGEMENT SOLUTIONS WHEN TAKING INTO ACCOUNT THE ECONOMIC LIMITS OF THE APPLICATION OF ELECTRIC VEHICLES IN BUSINESS ACTIVITIES

PorfirenkoVolodymyr I., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Management Department, e-mail: porfirenko@gmail.com, tel. +380 67 5034433, Ukraine, 01010, Kyiv, Mykhailo Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, room 242. https://orcid.org/0000-0003-0329-6217

Lugovtsov Anton S., student, National Transport University, e-mail: lugovcovanton9@gmail.com, tel. +380 68 327 3691, Ukraine, 01010, Kyiv, Mykhailo Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, room 242. https://orcid.org/0009-0004-1342-706X

Abstract. The article is devoted to the study of trends in the choice of management decisions taking into account the economic limits of the use of electric vehicles in business activities. Electric vehicles have gained significant development and distribution today. Recently, electric trucks, electric buses have begun to appear on the market, and various electric vehicles have also become widely used. In these conditions, entrepreneurs are faced with a difficult choice: to update their fleet with new electric vehicles or classic, time-tested cars with an ICE (Internal Combustion Engine). Electric vehicles open up new opportunities for reducing the harmful impact on the environment, reducing operating costs and improving air quality. At the same time, there are certain challenges and nuances that require attention when switching to electric vehicles on international, intercity and urban routes.

The object of the study is the economic feasibility of using electric vehicles in business activities.

The purpose of the work is to study the impact of electric vehicles on the environment and to justify the economic feasibility of their use in business activities.

Research methods are statistical and comparative methods.

The main advantages and disadvantages of electric vehicles compared to cars with internal combustion engines were analyzed. The environmental impact of both types of vehicles on the environment was compared. The analysis of programs to stimulate the purchase of electric vehicles in Ukraine and the world was conducted. The economic feasibility of using electric vehicles for business activities was substantiated.

Keywords: electric vehicles, internal combustion engines, environmental friendliness, electric buses, electric trucks, economic feasibility, batteries, costs, entrepreneurship, management decision, feasibility of operating electric vehicles.

References

1. Chy ekolohichni elektromobili? URL: https://www.products.pcc.eu/uk/blog/%D1%87%D0%B8-%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%87%D0%BD%D1%96- %D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D1%96%D0%BB%D1%96/#przypis3

2. Tesla stverdzhuye, shcho teper mozhe pereroblyaty 92% materialiv akumulyatornykh elementiv. URL: https://www.deassociation.ca/newsfeed/tesla-says-it-can-now-recycle-92-of-battery-cell-materials 3.U YES zaboronyly prodazh avtomobiliv na benzyni z 2035 roku. URL: https://www.dw.com/uk/u-es-ne-prodavatimut-avtomobili-na-benzini-ta-dizeli-z-2035-roku/a-64703152

3. ECOFACTOR Shcho krashche: elektromobil′ chy benzynovyy avtomobil′? URL: https://ecofactortech.com/ua/what-is-better-an-electric-car-or-gasoline/

4. Pil′hy ta novovvedennya dlya elektromobiliv. URL: https://ncars.com.ua/media/pilgy-ta-novovvedennia-dlia-elektromobiliv/

5. Sekret uspikhu: yak Norvehiya pereyshla na elektromobili. URL: https://www.dw.com/uk/sekret-uspihu-ak-norvegia-perejsla-na-elektromobili/a-71254467

6. Derzhavni pil′hy ta prohramy dlya vlasnykiv elektromobiliv v Ukrayini u 2025 rotsi. URL: https://x-auto.com.ua/derzhavni-pilhy-ta-prohramy-dlya-vlasnykiv-elektromobiliv-v-ukraini-u-2025-rotsi/

7. Den′ za dnem. Vyhidno chy ni kupuvaty elektromobil′ u 2025 rotsi: rozbyrayemosya v detalyakh. URL: https://denzadnem.com.ua/blogy/korysni-porady/199652

8.Den′ za dnem. Vyhidno chy ni kupuvaty elektromobil′ u 2025 rotsi: rozbyrayemosya v detalyakh. URL: https://denzadnem.com.ua/blogy/korysni-porady/199652 9.Doslidzhennya Consumer Reports pokazuye, shcho vytraty na obsluhovuvannya elektromobiliv na 50% menshi, nizh u avtomobiliv z benzynovym dvyhunom. URL: https://betterenergy.org/blog/consumer-reports-study-finds-electric-vehicle-maintenance-costs-are-50-less-than-gas-powered-cars/?utm_source=chatgpt.com

9.Doslidzhennya Consumer Reports pokazuye, shcho vytraty na obsluhovuvannya elektromobiliv na 50% menshi, nizh u avtomobiliv z benzynovym dvyhunom. URL: https://betterenergy.org/blog/consumer-reports-study-finds-electric-vehicle-maintenance-costs-are-50-less-than-gas-powered-cars/?utm_source=chatgpt.com

10.Vytraty na tekhnichne obsluhovuvannya elektromobiliv porivnyano z avtomobilyamy z dvyhunamy vnutrishn′oho z·horyannya. URL: https://www.driveelectrictn.org/maintenance-costs-for-evs-vs-ice-vehicles/?utm_source=chatgpt.com

11.Skil′ky koshtuye zaryadyty elektromobil′ u travni 2025 roku? URL: https://eauto.org.ua/news/807-skilki-koshtuye-zaryaditi-elektromobil-u-travni-2025-roku

12.Vartist′ zaryadky elektromobilya v Yevropi: shcho varto znaty? URL: https://ecofactortech.com/ua/how-much-does-it-cost-to-charge-an-electric-car-in-europe/

13.Skil′ky koshtuye zaryadyty elektromobil′. URL: https://www.bloomberg.com/news/newsletters/2024-10-10/how-much-does-it-cost-to-charge-an-electric-car-it-s-complicated?srnd=undefined

14.Seredni tsiny na palyvo v Ukrayini za danymy AutoRia. URL: https://auto.ria.com/uk/toplivo/a95/

15.Seredni tsiny na palyvo v Ukrayini za danymy Minfin. URL: https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/tm/

16. Volkswagen T-Roc 2.0 TDI (190 l.s.) 7-DSG 4x4. URL: https://volkswagen-t-roc.infocar.ua/mod_14283_t-roc_id5336.html

17.Volkswagen T-Roc 2.0 TSI (190 l.s.) 7-DSG 4x4. URL: https://volkswagen-t-roc.infocar.ua/mod_10724_t-roc_id5336.html

18.Volkswagen ID.4 150 kW (77 kWh) (204 l.s). URL: https://volkswagen-id-4.infocar.ua/mod_15376_id-4_id6279.html

19. Porfirenko V.I. Innovatsiynyy modul′nyy rozvytok merezhi elektrobusnykh pasazhyrs′kykh perevezen′ v mehapolisakh: « Innovatsiynyy rozvytok transportnoho kompleksu: monohrafiya / Za zahal. redaktsiyeyu prof. Lozhachevs′koyi O.M. Kyyiv: Milenium, 2021. S. 130-140.

20.Porfirenko V.I., Kudin YE. R., Mizhnarodni perevezennya elektromobilyamy: perevahy zastosuvannya modul′noho pryntsypu sektsiynoho vypusku ta zaminy akumulyatornykh batarey. Naukovyy zhurnal «Avtomobil′ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo», 2024. Vypusk 116. Chastyna 1. ISSN 0365-8171 (Print), ISSN 2707-4080 (Online), ISSN 2707-4099 (CD), http://addb.ntu.edu.ua. Scientific journal «AUTOMOBILE ROADS AND ROAD CONSTRUCTION», 2024. Issue 116. Rart 1. S.294. https://DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.1-294-313

21.V Ukrayinu prybuv pershyy elektrychnyy tyahach: na shcho zdaten takyy vantazhnyy avtomobil′. URL: https://blik.ua/automobile/4154-v-ukrayinu-pribuv-pershii-elektrichnii-tyagach-na-sho-zdaten-takii-vantazhnii-avtomob

УДК 338.47:656:005.591.6 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-475-485**

UDC 338.47:656:005.591.6

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ В УМОВАХ ІНДУСТРІАЛЬНИХ РЕВОЛЮЦІЙ ЯК ДЕТЕРМІНАНТА ПІДВИЩЕННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ

DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT COMPLEX IN THE CONDITIONS OF INDUSTRIAL REVOLUTIONS AS A DETERMINANT OF INCREASING THE COMPETITIVENESS OF ENTERPRISES



Малахова Юлія Анатоліївна, *кандидат економічних наук, доцент, доцент, доцент кафедри менеджменту, Національний транспортний університет, Київ, Україна,*
e-mail: yu.malakhova@ntu.edu.ua, тел.+380442808438

https://orcid.org/0000-0002-8769-7597

Анотація: У статті розглянуто еволюцію розвитку транспортного комплексу в контексті індустріальних революцій як ключового чинника підвищення конкурентоспроможності підприємств. Обґрунтовано, що кожна хвиля індустріального розвитку формувала нові технологічні, організаційні та управлінські засади функціонування транспорту. Здійснено систематизацію наукових підходів до аналізу впливу технологічних трансформацій на ефективність транспортних процесів, екологічну сталість та рівень інноваційної активності підприємств галузі.

Визначено, що сучасний етап розвитку транспортного комплексу характеризується глибокою інтеграцією цифрових технологій Індустрії 4.0 – інтернету речей, аналітики великих даних, штучного інтелекту, блокчейну та кіберфізичних систем – у логістичні процеси, що сприяє формуванню нових конкурентних переваг. Наголошено, що поява Індустрії 5.0 актуалізує перехід від технократичної парадигми до людиноцентричної, у межах якої конкурентоспроможність підприємств забезпечується поєднанням ефективності, сталості та соціальної відповідальності.

Особливу увагу приділено взаємозв'язку між рівнем технологічної зрілості транспортного комплексу, розвитком інноваційної інфраструктури та здатністю підприємств адаптуватися до глобальних викликів. Доведено, що цифровізація, автоматизація та екологізація транспортних систем стають визначальними детермінантами конкурентоспроможності автотранспортних підприємств у постіндустріальну епоху. Запропоновано концептуальну модель розвитку транспортного комплексу в умовах Індустрії 4.0–5.0, яка базується на інтеграції технологічних інновацій, принципів сталого розвитку та адаптивного управління.

Отримані результати можуть бути використані для формування стратегій підвищення ефективності та конкурентоспроможності автотранспортних підприємств, модернізації галузевої політики, а також для розроблення науково-методичних рекомендацій щодо управління інноваційними процесами у транспортному секторі України.

Ключові слова: транспортний комплекс, розвиток, Індустрія 4.0, Індустрія 5.0, людиноцентричність, цифровізація, сталий розвиток, конкурентоспроможність, транспортні підприємства, інновації.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Інноваційний розвиток транспортного сектору є невід'ємною складовою еволюції світової економіки, що відображає глибокі трансформації, зумовлені індустріальними революціями. Кожна з них кардинально змінювала технологічні, організаційні та управлінські засади функціонування транспорту. Від механічної енергії парових машин до використання штучного інтелекту та кіберфізичних систем – розвиток транспорту виступав ключовим індикатором і водночас каталізатором суспільного прогресу.

Сучасний етап характеризується впливом четвертої та зародженням п'ятої індустріальної революції, що поєднують цифровізацію, автоматизацію, інтернет речей, штучний інтелект і стратегії сталого розвитку. Транспортна галузь стає центром технологічних і організаційних змін, спрямованих на створення безпечних, енергоефективних та екологічно збалансованих систем мобільності. Індустріальні революції формують нові моделі управління транспортними процесами, засновані на даних, інтеграції нових технологій та інтелектуальних систем, аналітиці великих даних і гнучких бізнес-моделях.

Дослідження впливу індустріальних революцій на розвиток транспортного сектору має не лише теоретичну, а й практичну значущість, оскільки дозволяє виявити закономірності технологічного оновлення, оцінити потенціал впровадження інновацій та сформувати стратегічні пріоритети модернізації транспортної інфраструктури. Особливого значення набуває аналіз періоду Індустрії 5.0, що орієнтований на гармонізацію технологічного прогресу з людським і природним середовищем. Саме людиноцентричність, інтелектуальність і сталість є ключовими детермінантами нової парадигми розвитку транспорту, що визначатимуть його конкурентоспроможність у майбутньому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика впливу індустріальних революцій на транспортний комплекс отримала значний розвиток у зарубіжній та вітчизняній науковій літературі. У більшості досліджень простежується думка, що кожна хвиля індустріального розвитку виступала каталізатором структурних змін у транспортній галузі. Так, історичні праці підкреслюють роль першої індустріальної революції у поширенні залізничних мереж, що забезпечило прискорену індустріалізацію Європи та Північної Америки. Подальші дослідження (кінець XIX – початок XX ст.) зосереджувалися на впливі двигуна внутрішнього згоряння на становлення автомобільного транспорту та авіації.

Сучасний науковий дискурс переважно пов'язаний із концепціями Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0, а також із дослідженням їх впливу на екологічність, ефективність та безпеку транспортних систем. Закордонні науковці S. Sahoo, A. Kumar, S. Kumar Mangla, A. Tiwari, X. Li, T. Yang, Z. Zhu, M.Givoni, D.Banister, V. Patyal , P. Sarma, S. Modgil, T. Nag, D Dennehy підкреслюють, що інтеграція технологій Індустрії 4.0 у транспорт сприяє розвитку екоінновацій, оптимізації використання ресурсів, досягненню цілей сталого розвитку, переходу до циркулярної економіки [1-4]. Українські науковці С.Клюєв, Б.Юров, В.Поляк, Т.Яворська, Я.Молодцов, С. Назаренко, Н.Бойко, І.Демішев, С.Войтко, Л.Ноджак, М.Паращич також приділяють значну увагу інноваційним аспектам транспортного розвитку через призму впливу розвитку індустрії [5-10].

Окремим напрямом аналізу є дослідження Індустрії 5.0 як майбутнього тренду транспортного розвитку. На думку багатьох дослідників, Індустрія 5.0 створює умови для поєднання автоматизації з людиноцентричним підходом, що матиме вирішальне значення для безпеки та персоналізації транспортних послуг [11-17].

Проте у вітчизняній науці поки що недостатньо досліджень, що поєднують концепцію Індустрії 5.0, з її акцентом на людиноцентричність, екологічну сталість та соціальні аспекти, безпосередньо в транспортному комплексі, що визначає наукову нішу для подальших досліджень, спрямованих на інтеграцію інноваційних технологій з принципами сталого розвитку у вітчизняному транспортному секторі.

Матеріали та методи. Методологічною основою дослідження виступають такі традиційні загальнонаукові та спеціальні методи: системний – для комплексного розгляду розвитку транспортного комплексу як цілісної соціо-економічної системи; логічний та історичний - простеження етапності

індустріальних революцій і виявлення їх впливу на конкурентоспроможність підприємств; індукції та дедукції –формування теоретичних узагальнень на основі вивчення конкретних емпіричних даних; систематизації та класифікації – впорядкування технологічних і організаційних змін у транспортному секторі; синтезу й аналізу – визначення взаємозв'язків між технологічними інноваціями, екологічною сталістю та ефективністю управління.

Метою роботи. Метою дослідження є обґрунтування теоретико-методичних засад розвитку транспортного комплексу в умовах індустріальних революцій та визначення його ролі як детермінанти підвищення конкурентоспроможності автотранспортних підприємств шляхом інтеграції цифрових технологій, інноваційних підходів до управління й принципів сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу. Транспортний комплекс є фундаментальною основою соціально-економічного розвитку, що забезпечує мобільність населення, доступ до ресурсів і ринків, формування глобальних ланцюгів постачання та інтеграцію національної економіки до світового господарства. В історичній ретроспективі саме індустріальні революції виступали ключовим чинником трансформації транспортної системи, змінюючи її технічний рівень, організаційні моделі та стратегічні пріоритети. Кожен етап індустріального розвитку супроводжувався появою нових видів транспорту, розширенням масштабів перевезень і підвищенням їхньої ефективності.

Сучасний розвиток транспортної сфери відбувається в умовах посилення глобальної конкуренції, динамічних змін попиту на перевезення та зростання вимог до екологічної безпеки. З одного боку, світові транспортні компанії стикаються з викликами, пов'язаними з вичерпанням традиційних енергетичних ресурсів, кліматичними змінами та необхідністю скорочення викидів парникових газів. З іншого боку, зростає потреба у цифровізації процесів, інтеграції «розумних» технологій та підвищенні рівня сервісу для споживачів.

В українському контексті актуальність питання впливу індустріальних революцій на транспорт зумовлена як внутрішніми, так і зовнішніми чинниками. До внутрішніх належать зношеність транспортної інфраструктури, низький рівень інноваційної активності підприємств та потреба в модернізації рухомого складу. Зовнішні чинники включають інтеграцію України до європейського транспортного простору, адаптацію до стандартів ЄС та необхідність забезпечення конкурентоспроможності на міжнародному ринку перевезень. Додатковим викликом є післявоєнне відновлення транспортної галузі, яке має здійснюватися на засадах інноваційності та сталого розвитку.

Узагальнюючи наукові підходи, можна стверджувати, що в літературі переважають два ключові напрями аналізу:

- технологічний – зосереджений на впливі цифрових технологій, автоматизації, інтелектуальних систем на ефективність транспортних процесів;
- екологічно-економічний – розглядає впровадження інновацій через призму зменшення негативного впливу транспорту на довкілля, інтеграції у циркулярну економіку та досягнення сталого розвитку.

Отже, розвиток транспортної галузі тісно пов'язаний із ключовими етапами індустріальних революцій. Кожна індустріальна епоха формувала нові принципи організації виробництва та споживання, що безпосередньо відбивалося на транспорті як стратегічній інфраструктурі. Саме транспорт став каналом поширення інновацій, засобом інтеграції ринків і каталізатором глобалізаційних процесів (табл. 1).

Період першої індустріальної революції позначився широким впровадженням парових машин і механізацією виробництва, що докорінно змінило транспортну сферу. Найбільш значущими досягненнями стали поява парових локомотивів і розвиток залізничної мережі, що сприяло різкому зростанню швидкості перевезень, розширенню національних ринків і формуванню єдиних економічних просторів . Водночас розвиток пароплавства забезпечив більш передбачувані та безпечні морські перевезення, що стало основою для розширення міжнародної торгівлі. У цей період транспорт перетворюється з допоміжної функції економіки на стратегічний фактор розвитку та інтеграції.

Таблиця 1 - Вплив індустріальних революцій на розвиток транспорту
Table 1 - Impact of industrial revolutions on transport development

Етап	Хронологічні межі	Ключові технології	Основні зміни у транспорті	Соціально-економічний ефект
Індустрія 1.0	Кінець XVIII – перша половина XIX ст.	Парова енергія, механізація виробництва	Поява паровозів і залізниць, розвиток пароплавства	Урбанізація, інтеграція національних ринків, стимулювання міжнародної торгівлі
Індустрія 2.0	Кінець XIX – перша половина XX ст.	Електрифікація, конвеєрне виробництво, хімічна промисловість	Масова моторизація (автомобілі), розвиток авіації, електрифікація залізниць, поява сучасної інфраструктури (дороги, аеропорти)	Глобалізація, мобільність населення, нові ринки збуту
Індустрія 3.0	Друга половина XX ст.	Електроніка, комп'ютери, автоматизація	Автоматизовані системи управління рухом, GPS-навігація, контейнеризація морських перевезень, електронні системи бронювання	Зростання ефективності логістики, стандартизація перевезень, формування глобальних ланцюгів постачання
Індустрія 4.0	Початок XXI ст. – сьогодення	Цифровізація, Інтернет речей (IoT), штучний інтелект, Big Data	Інтелектуальні транспортні системи, безпілотний транспорт, «розумні» міста, електромобілі та нові види мобільності	Екологізація транспорту, інтеграція у «розумну» інфраструктуру, персоналізація мобільності

Джерело: сформовано автором за [1-10]

Друга індустріальна революція, що базувалася на електрифікації та масовому виробництві, мала ще глибший вплив на транспорт. Поява автомобілів, виготовлених за конвеєрним принципом, спричинила масову моторизацію, що змінило міську інфраструктуру та спосіб життя людей. Авіація, яка зародилася в цей період, відкрила принципово нові можливості для пасажирських і вантажних перевезень, різко скорочуючи час подолання міжконтинентальних відстаней. У цей же час активно розвивалася транспортна інфраструктура: автомобільні дороги, аеропорти, електрифіковані залізниці. Таким чином, транспорт став ключовим рушієм глобалізаційних процесів і формування міжнародних ланцюгів поставок.

Третя індустріальна революція, зумовлена розвитком електроніки, інформаційних технологій і автоматизації, суттєво модернізувала транспортну систему. Розпочалося впровадження комп'ютеризованих систем управління рухом, електронних навігаційних комплексів, GPS-технологій. Транспортні компанії почали використовувати автоматизовані системи бронювання та управління, що радикально підвищило ефективність роботи та рівень сервісу, поява контейнеризації, сприяла стандартизації та здешевленню перевезень.

Таким чином, періоди Індустрії 1.0–3.0 визначили поступову трансформацію транспортної галузі: від механізації та парової тяги – до масової моторизації та авіації, а згодом – до автоматизації й інформаційних технологій. Кожен етап індустріальних революцій не лише вдосконалював технічні характеристики транспорту, а й змінював його соціально-економічне значення: транспорт став провідником глобалізації, фактором урбанізації та стратегічним інструментом конкурентоспроможності підприємств та держав у світовій економіці.

Індустрія 4.0 переформатовує транспортну галузь через набір взаємопов'язаних цифрових технологій: Інтернет речей (IoT), великі дані (Big Data) і аналітика, штучний інтелект (AI), цифрові двійники (digital twins), робототехніка та автономні системи, блокчейн для прозорості ланцюгів постачання, хмарні сервіси та кіберфізичні системи. Ці технології створюють кіберфізичну інфраструктуру, яка дає змогу збирати, обробляти й оперативно використовувати дані в режимі реального часу для управління потоками транспорту, прогнозування подій і прийняття рішень.

Сучасний транспортний комплекс перебуває в епіцентрі цифрової трансформації, що відбувається під впливом концепцій Індустрії 4.0. Технології штучного інтелекту, Інтернету речей, великих даних і блокчейну все ширше інтегруються в інфраструктурні рішення, змінюючи моделі організації перевезень, обслуговування та управління потоками (табл.2).

Таблиця 2 - Вплив концепції Індустрії 4.0 на різні види транспорту
Table 2 - Impact of Industry 4.0 on different modes of transport

Вид транспорту	Ключові інновації Індустрії 4.0	Основні ефекти
Автомобільний	- автономні транспортні засоби; - інтелектуальні транспортні системи; - інтернет речей для моніторингу транспорту та вантажів.	- зниження аварійності; - оптимізація маршрутів і зменшення заторів; - підвищення ефективності логістики.
Залізничний	- інтелектуальні системи управління рухом; - великі дані для планування завантаження та ремонтів; - енергоефективні поїзди з датчиками стану.	- зростання безпеки перевезень; - зниження витрат на технічне обслуговування; - підвищення швидкості та регулярності руху.
Морський	- смарт-порти; - використання інтернету речей і сенсорів для контролю вантажів; - цифрові платформи для логістики та відстеження контейнерів.	- підвищення прозорості ланцюгів постачання; - зниження витрат на перевалку; - оптимізація портових операцій.
Авіаційний	- автоматизовані системи управління польотами; - великі дані та штучний інтелект для прогнозування затримок; - smart-безпека (біометрія, розумні системи контролю).	- підвищення безпеки та швидкості обслуговування; - оптимізація рейсів і паливної ефективності ; - кращий сервіс пасажирів.
Міський громадський транспорт	- електронні квитки, мобільні додатки, аналітика великих даних; - автономні автобуси та трамваї ; - «розумна» мобільність (каршеринг, е-скутери, мобільність як сервіс).	- зручність для пасажирів; - оптимізація руху та зниження викидів; - інтеграція з іншими видами транспорту.

Джерело: сформовано автором за [4, 5, 7, 9, 18]

Узагальнення впливу технологій Індустрії 4.0 на транспортний комплекс свідчить, що цифровізація та інновації змінюють не лише технічні параметри перевезень, а й саму логіку функціонування транспортних систем. Кожен вид транспорту має власні пріоритети модернізації, проте загальною тенденцією є перехід від традиційних моделей експлуатації до інтелектуальних, автоматизованих та екологічно орієнтованих рішень**.**

Для автомобільного транспорту ключовим викликом стала поява автономних транспортних засобів і систем штучного інтелекту, що дозволяють знизити аварійність та підвищити ефективність логістичних процесів. Водночас ця сфера потребує кардинального оновлення нормативно-правової бази та вирішення проблем кібербезпеки, адже автономні системи є вразливими до зовнішніх втручань.

Залізничний транспорт, з огляду на свою системоутворюючу роль у національних економіках, активно впроваджує цифрові системи управління рухом і технології Big Data для оптимізації графіків та технічного обслуговування, що дозволяє знижувати експлуатаційні витрати та підвищувати швидкість перевезень. Проте модернізація потребує значних інвестицій і гармонізації з міжнародними стандартами безпеки.

Морський транспорт і портова діяльність орієнтуються на концепцію «розумних» портів, де використовуються автоматизовані крани, дрони та цифрові платформи для моніторингу вантажів. Завдяки цьому досягається ефект прозорості логістичних ланцюгів і зниження витрат на перевалку. Водночас глобальна цифровізація морської логістики породжує загрози кібератак, які можуть паралізувати роботу цілих портових систем.

Авіаційний транспорт, як найбільш технологічно насичений, демонструє широке використання автоматизованих систем управління польотами, інструментів штучного інтелекту для прогнозування затримок і «розумних» технологій у сфері безпеки, що суттєво підвищує ефективність і безпеку перевезень, але водночас ускладнює міжнародну стандартизацію та потребує високих витрат на захист.

Міський громадський транспорт найбільш чутливо реагує на потреби кінцевого користувача. Технології Індустрії 4.0 сприяють розвитку мобільності як послуги (MaaS), де інтегруються різні види транспорту в єдину цифрову платформу. Електронні квитки, мобільні додатки, автономні автобуси та електросамокати формують нову якість міської мобільності, орієнтованої на комфорт і екологічність. Основним бар'єром лишається необхідність значних інвестицій у «розумну» інфраструктуру та готовність суспільства приймати інноваційні рішення.

Таким чином, аналіз сучасного стану транспортного комплексу в контексті Індустрії 4.0 свідчить про глибоку трансформацію його функціонування. Вона проявляється у переході до гнучких, клієнтоорієнтованих, екологічно збалансованих моделей, що поєднують традиційні транспортні системи з цифровими інноваціями. Такий підхід створює передумови для наступного етапу еволюції – Індустрії 5.0, яка буде орієнтована не лише на ефективність і автоматизацію, а й на участь людини та сталий розвиток.

Індустрія 5.0 формує новий підхід до технологічних трансформацій, який поєднує технічні інновації, людський фактор і сталий розвиток**.** На відміну від Індустрії 4.0, де акцент робився на цифровізації та автоматизації, Індустрія 5.0 ставить у центр людину, екологію та соціальну відповідальність, інтегруючи технології в контекст сталого розвитку транспортного комплексу (рис.1).

В Індустрії 5.0 транспортні рішення орієнтовані на покращення якості життя людей та створення інклюзивної мобільності. Автономні транспортні системи та роботизовані логістичні ланцюги поєднуються з людським контролем і адаптивним дизайном інфраструктури завдяки адаптації під потреби людей з обмеженою мобільністю, водночас оптимізуючи енергоспоживання та пропускну спроможність [14].

Розглядаючи інновації та цифрові технології, Індустрія 5.0 передбачає використання штучного інтелекту, цифрових двійників та роботизованих систем не лише для ефективності, а й для сталості. У транспорті це проявляється у:

- прогнозуванні енергоспоживання та викидів за допомогою штучного інтелекту та великих даних;

- автономних і електричних транспортних засобах**,** які інтегруються у «розумні» логістичні мережі;

- цифрових двійниках інфраструктури, що дозволяють моделювати різні сценарії руху, навантаження та аварійних ситуацій для мінімізації екологічного впливу [17].

Інноваційні рішення в транспорті сприяють також оптимізації ланцюгів постачання**,** підвищуючи продуктивність і гнучкість у кризових умовах. Використання блокчейн-технологій забезпечує

прозорість і контроль за ланцюгами поставок, водночас знижуючи витрати і ризики несанкціонованих операцій.

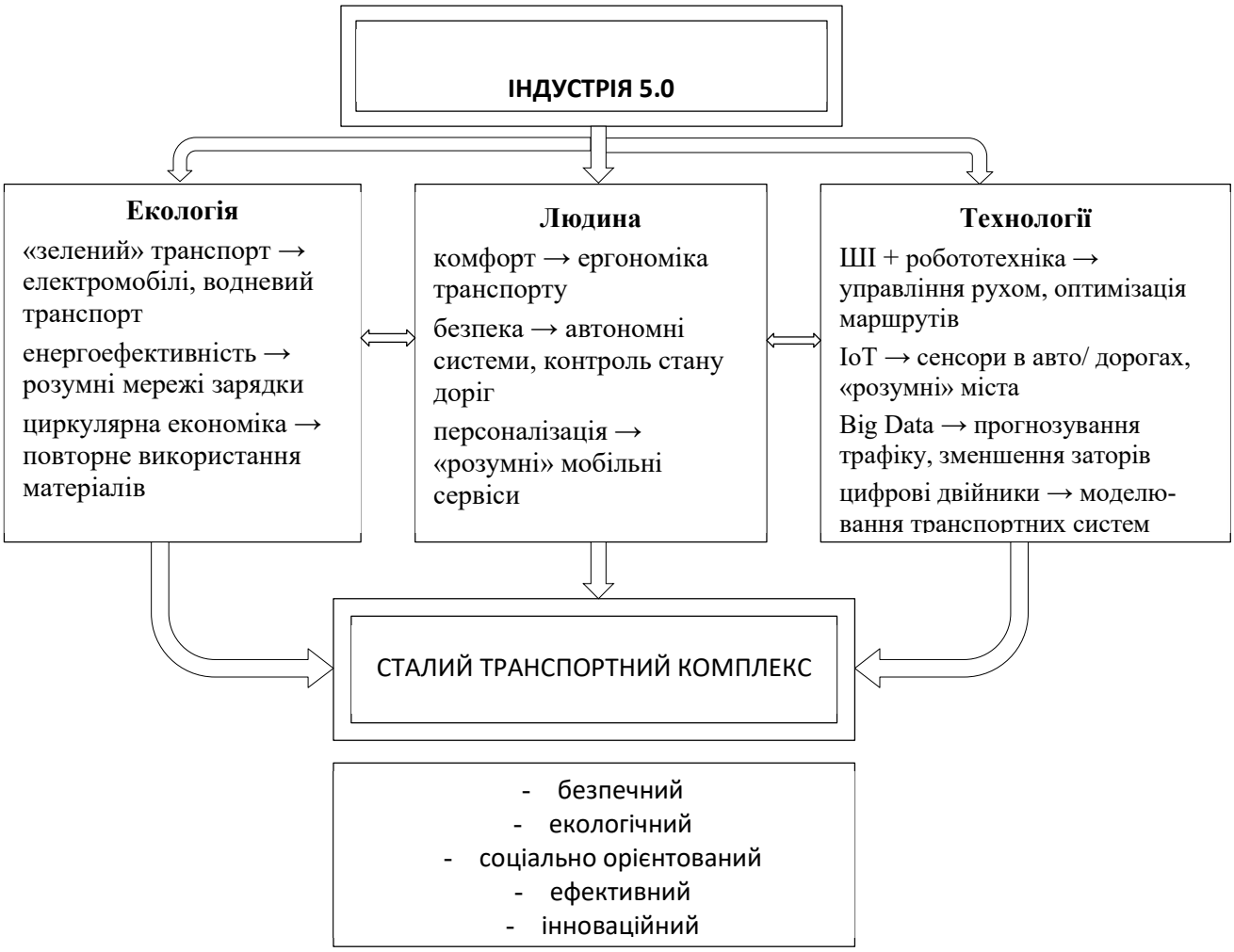


Рисунок 1 – Формування сталого транспортного комплексу в умовах концепції Індустрії 5.0
Джерело: сформовано автором за [11-15]
Figure 1 – Formation of a sustainable transport complex under the Industry 5.0 concept
Source: compiled by the author based on [11-15]

Ще одним ключовим аспектом концепції Індустрії 5.0 є екологічна стійкість транспортного комплексу, основні напрямки якого включають:

- зниження викидів CO_2 через оптимізацію маршрутів, електрифікацію транспортних засобів та інтеграцію відновлюваних джерел енергії;
- циркулярну економіку в логістиці та виробництві транспортної техніки (переробка матеріалів, оптимізація ресурсів);
- енергоефективність інфраструктури («розумні» порти, «розумні» залізничні станції, інтелектуальні світлофори та зарядні станції).

Вказані підходи не лише зменшують негативний вплив на довкілля, а й підвищують економічну ефективність транспорту за рахунок зменшення витрат на паливо та обслуговування.

Індустрія 5.0 акцентує увагу на соціальній відповідальності та інклюзивності транспортних систем, що передбачає доступність міського транспорту для людей з обмеженою мобільністю, створення безпечних зон для пішоходів і велосипедистів, а також використання цифрових сервісів, які спрощують взаємодію користувачів із транспортними мережами. Людиноцентричні інновації дозволяють інтегрувати транспорт у сучасні «розумні» системи, де мобільність стає доступним сервісом.

Отже, Індустрія 5.0 не розглядає технології ізольовано – вона об'єднує інновації, сталий розвиток і соціальну складову. Для транспортного комплексу це означає:

- застосування AI і цифрових двійників для прогнозування та мінімізації екологічного навантаження;
- інтеграцію автономних та електричних транспортних засобів у логістичні мережі;
- створення гнучкої, адаптивної та безпечної інфраструктури, що відповідає потребам населення і вимогам сталого розвитку.

Таким чином, Індустрія 5.0 формує транспортний комплекс майбутнього, який є не лише ефективним і автоматизованим, а й екологічно сталим, інноваційним і людиноцентричним. Перспективи її впровадження для України особливо актуальні в контексті післявоєнного відновлення інфраструктури, модернізації логістичних ланцюгів і інтеграції у європейський транспортний простір.

Висновок. Розвиток транспортного комплексу тісно пов'язаний з етапами індустріальних революцій, кожна з яких формувала нові технологічні, організаційні та управлінські засади функціонування підприємств. Доведено, що в умовах Індустрії 4.0 ключовими чинниками підвищення конкурентоспроможності автотранспортних підприємств є цифровізація, автоматизація, використання штучного інтелекту, аналітики великих даних та інтернету речей, які забезпечують підвищення ефективності транспортних процесів і зниження екологічного навантаження. Перспективи Індустрії 5.0 розширюють цю парадигму, акцентуючи увагу на людиноцентричності, соціальній відповідальності та сталому розвитку, що сприяє формуванню нової моделі управління конкурентоспроможністю – інтегрованої, інноваційної та екологічно збалансованої. Узагальнення результатів дозволило запропонувати концептуальну модель розвитку транспортного комплексу в умовах індустріальних революцій, яка базується на поєднанні технологічних інновацій, гнучкого управління, ресурсної ефективності та екологічної стійкості.

Отримані результати можуть бути використані для удосконалення стратегій підвищення конкурентоспроможності транспортних підприємств України, формування державної політики модернізації транспортної інфраструктури та розроблення механізмів інтеграції у європейський транспортний простір.

Перелік посилань

1. S. Sahoo, A. Kumar, S. Kumar Mangla, A. Tiwari. Industry 4.0 adoption and eco-product innovation capability – Understanding the role of supply chain integration. *Business Strategy and the Environment.* 2024. Volume 33, Issue 8. Pages 8798-8814. DOI: https://doi.org/10.1002/bse.3949

2. Xin Li, Tao Yang, Ziqian Zhu, Zhuotong Zeng, Guangming Zeng, Jie Liang, Xuwu Chen, Xiaodong Li. A study on air pollution exposure of "first and last mile" urban commuters under space-behavior dual verification based on big data, land-use regression model and space syntax. *Journal of Cleaner Production.* 2023. Volume 419, 20. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138244

3. Givoni, M., & Banister, D. Sustainable transport futures: Integrating digitalization, decarbonization and resilience. *Transport Reviews.* 2021. Volume 41(4). Pages 457–475. DOI: https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1857887

4. Vishal Singh Patyal , P.R.S. Sarma, Sachin Modgil, Tirthankar Nag, Denis Dennehy. Mapping the links between Industry 4.0, circular economy and sustainability: a systematic literature review. *Journal of Enterprise Information Management.* 2022. Volume 35 (1). Pages. 1–35. DOI: https://doi.org/10.1108/JEIM-05-2021-0197

5. Клюєв С. О., Юров Б. В. Дослідження трансформації транспортної логістики в Україні в умовах індустрії 4.0. *Вісник СНУ імені В. Даля*. 2021. № 4 (268). С. 64–72. URL: DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-66-71

6. Поляк В.В. і Яворська Т.М. Цифровізація транспортної інфраструктури України. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні аспекти сучасних міждисциплінарних досліджень».* (Груд 2024), 64-67. Вип. 24. С. 120–128. URL: https://jpasmd.donnu.edu.ua/article/view/16710.

7. Клюєв С.О., Молодцов Я.А. Сприятливі фактори і очікувані ефекти автоматизації та впровадження індустрії 4.0 на автомобільному транспорті. *Логістичне управління та безпека руху на транспорті: збірник наукових праць науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених.,* 1-2 грудня 2020 р. СНУ ім. В. Даля. Сєвєродонецьк. 2020. С. 73–76.

8. Назаренко С. А., Бойко Н. С. Україна на шляху до Індустрії 4.0 та 5.0: інноваційний розвиток економіки та виклики управління взаємовідносинами. *Вісник ХДУ Серія Економічні науки*. 2023. № 49. Вип. 1. С. 44-50. DOI: https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-49-7

9. Демішев І., Войтко, С. Перспективи залучення інвестицій в розвиток Індустрії 4.0 в Україні. *Економіка та суспільство*. 2024 (61). DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-61-46

10. Ноджак, Л., & Паращич, М. Розвиток 4.0 індустрії в Україні: проблеми, перспективи. *Економіка та суспільство*. 2022 (45). DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-29

11. Mohammad Shamsuddoha,Mohammad Abul Kashem,Tasnuba Nasir. A Review of Transportation 5.0: Advancing Sustainable Mobility Through Intelligent Technology and Renewable Energy. *Future Transp.* 2025. *5*(1), 8. DOI: https://doi.org/10.3390/futuretransp5010008

12. García Collazos J. S., Cardenas Ardila L. M, C. J. Franco Cardona. Energy transition in sustainable transport: concepts, policies, and methodologies. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-34862-x

13. Belma Turan, Vera Hemmelmayr, Allan Larsen, Jakob Puchinger. Transition towards sustainable mobility: the role of transport optimization. *Central European Journal of Operations Research.* 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10100-023-00888-8

14. Колесніков В. О. Індустрія 5.0. як вона вплине на транспортну галузь та енергомашинобудування? *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: XI-та міжн. науково-практичн. конф.,* 13–14 квітня 2023 р. С. 172–174. ISBN 978-966-641-929-6. URL: https://www.researchgate.net/publication/371071474_Kolesnikov_V_O_Industria_50_ak_vona_vpline_na_transportnu_galuz_ta_energomasinobuduvanna_Problemi_i_perspektivi_rozvitku_avtomobilnogo_transportu_HI-ta_mizn_naukovo-prakticn_konf_13-14_kvitna_2023_r_m

15. Ложачевська О. М., Марціпака В. М. Інноваційний розвиток транспортного комплексу в умовах цифрової трансформації. Проблеми та механізми трансформації економічних систем. 2023. № 10. DOI: DOI: https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-10

16. Коваленко Н.В., Малахова Ю.А, Константінов Я.О., Хміль С.М. Концептуальні засади організації транспортних послуг у сучасних умовах. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво».* 2024. Вип. 115 (1). С.208 - 216. DOI: https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.1-208-216

17. Dmitry Ivanov. The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research.* 2023. Volume 61. Pages 1683-1695. DOI: https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892

18. Kovalenko, Nataliia, Malakhova, Yuliia, Borets, Iryna, Cherednichenko, Kostiantyn, Borets, Oleksii. Assessment of Risks During the Transport Process in Integrated Transport Systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. Pp. 414-425. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87379-9_38

DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT COMPLEX IN THE CONDITIONS OF INDUSTRIAL REVOLUTIONS AS A DETERMINANT OF INCREASING THE COMPETITIVENESS OF ENTERPRISES

Malakhova Yulia A., Ph.D. Economics, associate professor department of management, National Transport University, e-mail: yu.malakhova@ntu.edu.ua, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovich-Pavlenko str., 1. https://orcid.org/0000-0002-8769-7597

Summary The article examines the evolution of the development of the transport complex in the context of industrial revolutions as a key factor in increasing the competitiveness of enterprises. It is substantiated that each wave of industrial development has formed new technological, organizational and managerial principles for the functioning of transport. A systematization of scientific approaches to the analysis of the impact of technological transformations on the efficiency of transport processes, environmental sustainability and the level of innovative activity of enterprises in the industry has been carried out.

It is determined that the current stage of development of the transport complex is characterized by the deep integration of digital technologies of Industry 4.0 - the Internet of Things, big data analytics, artificial intelligence, blockchain and cyber-physical systems - into logistics processes, which contributes to the formation of new competitive advantages. It is emphasized that the emergence of Industry 5.0 actualizes the transition from a technocratic paradigm to a human-centric one, within which the competitiveness of enterprises is ensured by a combination of efficiency, sustainability and social responsibility.

Particular attention is paid to the relationship between the level of technological maturity of the transport complex, the development of innovative infrastructure and the ability of enterprises to adapt to global challenges. It is proven that digitalization, automation and greening of transport systems are becoming key determinants of the competitiveness of motor transport enterprises in the post-industrial era. A conceptual model of the development of the transport complex in the conditions of Industry 4.0–5.0 is proposed, which is based on the integration of technological innovations, principles of sustainable development and adaptive management.

The results obtained can be used to form strategies for increasing the efficiency and competitiveness of motor transport enterprises, modernizing industry policy, as well as for developing scientific and methodological recommendations for managing innovation processes in the transport sector of Ukraine.

Keywords: transport complex, development, Industry 4.0, Industry 5.0, human-centricity, digitalization, sustainable development, competitiveness, transport enterprises, innovations.

References

1. Sahoo, S., Kumar, A., Kumar Mangla, S., & Tiwari, A. (2024). Industry 4.0 adoption and eco-product innovation capability – Understanding the role of supply chain integration. *Business Strategy and the Environment, 33*(8), 8798–8814. https://doi.org/10.1002/bse.3949

2. Li, X., Yang, T., Zhu, Z., Zeng, Z., Zeng, G., Liang, J., Chen, X., & Li, X. (2023). A study on air pollution exposure of "first and last mile" urban commuters under space-behavior dual verification based on big data, land-use regression model and space syntax. *Journal of Cleaner Production, 419*, Article 138244. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138244

3. Givoni, M., & Banister, D. (2021). Sustainable transport futures: Integrating digitalization, decarbonization and resilience. *Transport Reviews, 41*(4), 457–475. https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1857887

4. Patyal, V. S., Sarma, P. R. S., Modgil, S., Nag, T., & Dennehy, D. (2022). Mapping the links between Industry 4.0, circular economy and sustainability: A systematic literature review. *Journal of Enterprise Information Management, 35*(1), 1–35. https://doi.org/10.1108/JEIM-05-2021-0197

5. Kliuiev, S. O., & Yurov, B. V. (2021). Doslidzhennia transformatsii transportnoi lohistyky v Ukraini v umovakh industrii *4.0 [Research on the transformation of transport logistics in Ukraine under*

Industry 4.0 conditions]. Visnyk SNU imeni V. Dalia, 4(268), 64–72. https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-66-71 [in Ukrainian]

6. Polyak, V. V., & Yavorska, T. M. (2024, December). Tsyfrovizatsiia transportnoi infrastruktury Ukrainy [Digitalization of Ukraine's transport infrastructure]. In *Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference "Applied Aspects of Modern Interdisciplinary Research"* (Vol. 24, pp. 120–128). https://jpasmd.donnu.edu.ua/article/view/16710 [in Ukrainian]

7. Kliuiev, S. O., & Molodtsov, Ya. A. (2020, December 1–2). Spryiatlyvi faktory i ochikuvani efekty avtomatyzatsii ta vprovadzhennia industrii 4.0 na avtomobilnomu transporti [Favorable factors and expected effects of automation and Industry 4.0 implementation in road transport]. In *Logistychne upravlinnia ta bezpeka rukhu na transporti: zbirnyk naukovykh prats* (pp. 73–76). SNU im. V. Dalia. [in Ukrainian]

8. Nazarenko, S. A., & Boiko, N. S. (2023). Ukraina na shliakhu do Industrii 4.0 ta 5.0: innovatsiinyi rozvytok ekonomiky ta vyklyky upravlinnia vzaiemovidnosynamy [Ukraine on the way to Industry 4.0 and 5.0: Innovative economic development and management challenges]. *Visnyk KSU. Seriia Ekonomichni nauky, 49*(1), 44–50. https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-49-7 [in Ukrainian]

9. Demishev, I., & Voitko, S. (2024). Perspektyvy zaluchennia investytsii v rozvytok Industrii 4.0 v Ukraini [Prospects for attracting investment in the development of Industry 4.0 in Ukraine]. *Ekonomika ta suspilstvo, 61*. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-61-46 [in Ukrainian]

10. Nodzhak, L., & Parashchych, M. (2022). Rozvytok 4.0 industrii v Ukraini: problemy, perspektyvy [Development of Industry 4.0 in Ukraine: Problems and prospects]. *Ekonomika ta suspilstvo, 45.* https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-29 [in Ukrainian]

11. Shamsuddoha, M., Kashem, M. A., & Nasir, T. (2025). A review of Transportation 5.0: Advancing sustainable mobility through intelligent technology and renewable energy. *Future Transportation, 5*(1), Article 8. https://doi.org/10.3390/futuretransp5010008

12. García Collazos, J. S., Cardenas Ardila, L. M., & Franco Cardona, C. J. (2024). *Energy transition in sustainable transport: Concepts, policies, and methodologies. Environmental Science and Pollution Research.* https://doi.org/10.1007/s11356-024-34862-x

13. Turan, B., Hemmelmayr, V., Larsen, A., & Puchinger, J. (2024). Transition towards sustainable mobility: The role of transport optimization. *Central European Journal of Operations Research.* https://doi.org/10.1007/s10100-023-00888-8

14. Kolesnikov, V. O. (2023, April 13–14). Industriia 5.0: yak vona vplyne na transportnu haluz ta enerhomashynobuduvannia? [Industry 5.0: How it will affect the transport sector and energy engineering]. *In* Problemy i perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu: *11th International Scientific and Practical Conference* (pp. 172–174).. https://www.researchgate.net/publication/371071474 [in Ukrainian]

15. Lozhachevska, O. M., & Martsipaka, V. M. (2023). Innovatsiinyi rozvytok transportnoho kompleksu v umovakh tsyfrovoi transformatsii [Innovative development of the transport complex under digital transformation]. *Problemy ta mekhanizmy transformatsii ekonomichnykh system, 10.* https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-10 [in Ukrainian]

16. Kovalenko, N. V., Malakhova, Y. A., Konstantinov, Ya. O., & Khmil, S. M. (2024). Kontseptualni zasady orhanizatsii transportnykh posluh u suchasnykh umovakh [Conceptual principles of organizing transport services in modern conditions]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnye budivnytstvo, 115*(1), 208–216. https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.1-208-216 [in Ukrainian]

17. Ivanov, D. (2023). The Industry 5.0 framework: Viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research, 61*, 1683–1695. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892

18. Kovalenko, N., Malakhova, Y., Borets, I., Cherednichenko, K., & Borets, O. (2025). Assessment of risks during the transport process in integrated transport systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 414-425. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87379-9_38

УДК 004.9:005.8:625.7/.8
UDC 004.9:005.8:625.7/.8
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-486-502

МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ПОРТФЕЛЯМИ ПРОЄКТІВ В ГАЛУЗІ ДОРОЖНЬОГО БУДІВНИЦТВА

METHODS OF PROJECT PORTFOLIO MANAGEMENTIN THE ROAD CONSTRUCTION INDUSTRY



***Данченко Олена Борисівна**, доктор технічних наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, elen_danchenko@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-5657-9144*



***Куліков Олег Михайлович**, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, http://orcid.org/0000-0003-2675-4946*

Анотація. Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю вдосконалення і подальшого розвитку методологічних підходів до управління портфелями проєктів, у частині формування останніх з урахуванням особливостей галузі дорожнього будівництва.

Мета дослідження полягає у підвищенні результативності і ефективності управління портфелями проєктів в галузі дорожнього будівництва шляхом розробки методів управління ними.

Об'єкт дослідження – процес управління портфелями проєктів в галузі дорожнього будівництва.

Предмет дослідження – підходи, моделі та методи формування портфелю проєктів та управління ним.

Методика дослідження. Дослідження проводилось на підставі практики застосування проєктного підходу та портфельно-орієнтованого управління в галузі дорожнього будівництва. При формуванні понятійної бази дослідження, а також аналізі наукових робіт використано метод наукової ідентифікації і зіставно-порівняльного аналізу; при розробці методу формування портфелю проєктів в галузі дорожнього будівництва – стратегій управління запасами FEFO, FIFO, LIFO та HIFO; при розробці методу управління портфелями проєктів в галузі дорожнього будівництва – системного підходу, стратегічного управління.

Ключові слова: системний підхід, стратегічне управління, портфель проєктів, управління портфелями проєктів, портфельно-орієнтоване управління, формування портфелю проєктів, дорожнє будівництво.

Постановка проблеми. Галузь дорожнього будівництва є однією з основних складових національної економіки, що визначає мобільність населення, розвиток регіонів і конкурентоспроможність держави. В умовах воєнних руйнувань та необхідності відновлення транспортної інфраструктури України роль ефективного управління проєктами в галузі дорожнього будівництва значно зросла. Водночас, реалізація великої кількості взаємопов'язаних і взаємозалежних проєктів потребує системного підходу до їхнього узгодження, пріоритизації та контролю. З цієї точки зору управління портфелем проєктів стає не просто інструментом координації, а стратегічним механізмом забезпечення результативності та стійкості галузі [1, 2].

Проблема полягає в тому, що більшість наявних методів управління портфелем проєктів розроблені для загальнокорпоративних структур або IT-сектору, тоді як дорожнє будівництво має специфічні характеристики. Це висока капіталомісткість, залежність від природно-кліматичних умов, складність логістичних процесів, жорсткі вимоги до якості, безпеки й екологічності, а також багаторівнева система субпідрядників і контролю. Тому класичні інструменти портфельного менеджменту (як-от AHP, PERT, Balanced Scorecard чи EVA) потребують адаптації до галузевих умов.

Особливої актуальності набуває інтеграція цифрових інструментів управління, зокрема:

BIM-технології (Building Information Modeling) дають змогу створювати інформаційні моделі проєктів в галузі дорожнього будівництва, відстежувати етапи їх реалізації, здійснювати порівняльний аналіз планових і фактичних показників;

ERP-системи (Enterprise Resource Planning) забезпечують централізований облік і контроль ресурсів, фінансів, матеріалів, підрядників, дозволяючи синхронізувати бюджетування між проєктами портфеля;

GIS-платформи (Geographic Information Systems) надають просторову аналітику для визначення пріоритетів інвестування у відновлення доріг, мостів і транспортних вузлів;

AI/ML-алгоритми (штучний інтелект і машинне навчання) можуть прогнозувати строки будівництва, ризики зривів, рівень зносу та потребу в ремонті на основі історичних і сенсорних даних;

системи управління ризиками (Risk Management Systems) дозволяють моделювати сценарії, проводити аналіз чутливості, розраховувати інтегральний рівень ризику портфеля.

BI-платформи (Business Intelligence) сприяють побудові дашбордів, KPI-матриць і автоматизованих звітів для прийняття рішень на рівні портфеля.

Попри це, інтеграція таких інструментів у практику галузі дорожнього будівництва відбувається фрагментарно, без єдиної методологічної основи. Системи часто не взаємопов'язані між собою, що створює ризики дублювання даних, втрати інформації й неузгодженості управлінських рішень. Крім того, недостатньо розроблені методи кількісного оцінювання ефективності портфеля дорожніх проєктів, як з погляду фінансових показників (NPV, IRR, ROI), так і з точки зору соціально-економічного та екологічного ефекту (індекс стійкості, показники безпеки руху, енергозбереження, вплив на довкілля).

Таким чином, існує актуальне наукове завдання, що полягає у відсутності комплексного підходу до управління портфелем проєктів у галузі дорожнього будівництва, який би поєднував традиційні аналітичні методи з сучасними цифровими інструментами та принципами сталого розвитку. Необхідним є формування адаптивної методики, яка дозволить: оцінювати взаємозв'язки між проєктами та ресурсними потоками; здійснювати оптимізацію портфеля за критеріями ефективності, ризику та впливу на довкілля; забезпечувати автоматизований моніторинг виконання проєктів у реальному часі; підвищувати рівень прозорості та обґрунтованості управлінських рішень.

Огляд робіт. Проблематика управління портфелем проєктів є одним із важливих напрямів розвитку сучасної теорії управління проєктами, адже саме на портфельному рівні формується стратегічна відповідність між цілями організації та конкретними проєктами, що реалізуються. За останні два десятиліття наукова спільнота зосередила значну увагу на питаннях структуризації, пріоритизації, балансування та моніторингу портфелів проєктів, однак специфіка галузевого застосування, зокрема в галузі дорожнього будівництва, досліджена недостатньо. У цій сфері поєднуються технічна складність, багаторівнева управлінська ієрархія, висока вартість

капіталовкладень і значний вплив зовнішніх ризиків, що потребує розроблення гнучких і водночас формалізованих методів управління портфелями.

Аналіз сучасних публікацій свідчить, що провідні міжнародні школи управління проєктами (PMI, IPMA, APM, ISO) пропонують уніфіковані методології управління портфелями, однак їх практична імплементація в інфраструктурні галузі має низку обмежень. Зокрема, дорожнє будівництво характеризується значною територіальною розгалуженістю, сезонністю робіт, залежністю від державного фінансування та нормативного регулювання. Це ускладнює застосування універсальних моделей ранжування та оптимізації портфеля, розроблених для приватних корпорацій або IT-компаній. Відповідно, науковий інтерес зміщується у бік адаптації класичних методів портфельного управління до умов державних інфраструктурних проєктів, включно з дорожніми.

У нормативно-методичній базі після 2020 р. важливу роль відіграє серія ISO 21500. Узагальнюючі настанови з управління проєктами оновлено в ISO 21502:2020 [3], що закріплює процесний підхід, роль зацікавлених сторін і дозволяє використання гнучких (adaptive/hybrid) підходів; документ застосовний і на рівні програм та портфелів, що важливо для інфраструктурних галузей. В Україні ця база поступово імплементується через націоналізацію стандартів: зокрема ДСТУ ISO 21502:2025 (IDT до ISO 21502:2020) формально прийнято як настанову з керування проєктами, програмами та портфелями, що створює рамку для адаптації міжнародних практик у дорожній галузі.

Міжнародний стандарт ДСТУ ISO 21504:2025 (ISO 21504:2022) «Управління портфелями проєктів і програм» [4] визначає основні принципи побудови системи портфельного управління, спрямованої на реалізацію стратегічних цілей організації через узгоджене управління проєктами та програмами. Документ пропонує універсальні рекомендації, що можуть бути адаптовані для державних і приватних структур різного масштабу. Стандарт орієнтований на керівників, управлінців і команди, які відповідають за відбір, пріоритизацію та контроль портфелів, а також на стейкхолдерів, залучених до прийняття стратегічних рішень. Його положення формують методологічну основу для створення цілісної системи управління портфелями, не замінюючи при цьому спеціалізованих стандартів із управління окремими проєктами чи програмами.

У [5] авторами підкреслюється, що хоча роль управління портфелем проєктів у процесах оцінювання, відбору та визначення пріоритетів детально розглядалася раніше, все ж бракує узагальненої моделі факторів, які визначають ефективність цього управління в будівельній галузі. Дослідження, проведене із залученням галузевих експертів та методів інтерв'ю й Дельфі, спрямовано на систематизацію таких факторів. У результаті сформовано структуру з 18 ключових чинників, що охоплюють організаційні, технологічні, людські та процесні аспекти ефективного портфельного менеджменту. Найвагомішими виявлено організаційні фактори, які виступають основою для розвитку інших груп детермінант. Це дозволяє розглядати роботу як вагомий внесок у формування наукової основи подальших кількісних досліджень взаємозв'язків між компонентами ефективності управління портфелем у будівельній сфері.

Авторами у роботі [6] підкреслено важливість стратегічного управління проєктами в транспортному комплексі як інструменту досягнення сталого розвитку. Інтеграція екологічних, соціальних і економічних чинників у процес управління сприяє підвищенню стійкості транспортної інфраструктури, зменшенню негативного впливу на довкілля та покращенню якості життя населення. Стратегічний підхід дозволяє підвищити ефективність транспортних послуг, забезпечити гармонійне планування розвитку галузі та сприяти інтеграції країни у світові логістичні системи. Важливим аспектом дослідження є управління ризиками на всіх етапах життєвого циклу проєктів від планування до експлуатації та модернізації. Виявлено, що ризики можуть мати фінансовий, нормативний, технічний, екологічний і соціальний характер. Застосування ефективних методів їх оцінювання та контролю дозволяє мінімізувати наслідки невизначеності, уникати затримок у реалізації проєктів і зменшувати фінансові втрати. Таким чином, стратегічне управління на засадах сталого розвитку виступає основою для підвищення ефективності транспортної системи та формування безпечного, інноваційного й ресурсоефективного середовища її функціонування.

У дослідженні [7] розглянуто сучасні підходи та методології, що можуть слугувати основою для формування синкретичної методології управління проєктами відновлення дорожньої інфраструктури. Автор пропонує принципи інтегрованого підходу, який поєднує елементи класичних і гнучких методів управління з використанням сучасних IT-інструментів. Особливу увагу приділено потребі розроблення моделей взаємозв'язків між складовими такої методології, що дозволить підвищити узгодженість процесів планування, реалізації та контролю. Визначено основні напрями подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення систем управління проєктами відновлення транспортної інфраструктури. Отримані результати мають не лише практичне значення для підвищення ефективності управління, а й можуть бути використані в освітньому процесі під час підготовки фахівців дорожньо-транспортної галузі.

Авторами у [8] відзначено, що управління портфелем проєктів (PPM) у сфері розвитку інфраструктури залишається недостатньо вивченим, попри його важливе значення для досягнення стратегічних цілей організацій. Автори розглядають PPM як дворівневий процес: перший етап охоплює відбір оптимального набору проєктів, а другий – управління відібраними проєктами з метою підтримання стратегічної узгодженості. На основі аналізу інтерв'ю з експертами інфраструктурного сектору Норвегії встановлено, що більшість досліджень зосереджується переважно на етапі відбору, тоді як питання подальшого управління портфелем майже не висвітлюється. Респонденти підкреслюють відсутність стандартизованих методичних підходів і єдиних рекомендацій для управління інфраструктурними портфелями. Крім того, виявлено суттєві відмінності між підходами державних і приватних організацій, що свідчить про необхідність розроблення уніфікованої системи управління портфелями проєктів, адаптованої до специфіки інфраструктурної галузі.

У [9] розглядається питання впровадження принципів «зеленого переходу» у цивільному будівництві та аналізуються практики сталого управління двома великими європейськими мегапроєктами – автомагістраллю A16 Ring Road (Нідерланди) та тунелем Fehmarnbelt (Данія). Автори розглядають основні чинники сталості, серед яких державне регулювання, законодавчі вимоги, системи заохочення, технологічні інновації, оцінювання вуглецевого сліду, а також механізми моніторингу та відстеження екологічних показників. На основі аналізу документів, виїзних спостережень та інтерв'ю зі стейкхолдерами встановлено, що дієві політики й норми сприяють переходу будівельних проєктів до екологічно орієнтованої моделі управління, приносячи як екологічні, так і соціальні вигоди.

Автором у [10] здійснено аналіз інституційних механізмів публічного управління розвитком будівельної галузі в умовах децентралізації, що є актуальним у процесі реформування системи влади в Україні. Автор розкриває взаємозв'язки між поняттями «публічне управління», «децентралізація» та «будівельна галузь», акцентуючи на впливі передачі повноважень громадам на ефективність управління. Показано, що децентралізація потребує зміцнення інституційної спроможності місцевих органів, оновлення нормативно-правової бази та впровадження сучасних цифрових інструментів. Серед викликів виділено кадровий дефіцит, нерівномірність фінансування та фрагментарність регулювання. Запропоновано напрями вдосконалення управління, зокрема розвиток професійної підготовки, електронний моніторинг будівельних проєктів і залучення міжнародних інвестицій. Зазначено, що інтеграція стратегічного й просторового планування сприятиме формуванню ефективної системи багаторівневого врядування у сфері будівництва.

У [1] автори наголошують на тому, що проєктний підхід нині широко застосовується у різних сферах діяльності, зокрема в транспортній галузі, де він зарекомендував себе як ефективний інструмент управління підприємствами. З огляду на велику кількість напрямів роботи у транспортному секторі, автори пропонують об'єднувати окремі ініціативи у програми та портфелі проєктів для підвищення узгодженості стратегічних цілей. Аналіз наукових праць показав, що сучасний стан галузі потребує вдосконалення інструментів стратегічного управління та їх інтеграції в управлінські процеси. Дослідження доводить, що наявні підходи до управління портфелями проєктів можуть бути адаптовані до дорожнього будівництва, але потребують врахування його галузевої специфіки. Автори наголошують на необхідності впровадження інформаційних технологій управління портфелем

проєктів у дорожній сфері для підвищення ефективності стратегічного управління та використання ресурсів. Такі рішення сприятимуть формуванню цілісної системи управління розвитком дорожньої інфраструктури.

Авторами у [2, 11] відзначено, що для компаній дорожньо-будівельної галузі, які одночасно реалізують численні ініціативи, доцільним є використання портфельного управління проєктами, що забезпечує узгодженість стратегічних і оперативних цілей. Аналіз наукових джерел свідчить, що хоча існує значна кількість досліджень із питань стратегічного управління та управління портфелями, більшість із них не враховують галузевої специфіки дорожнього будівництва, що зумовлює потребу в подальших розробках. Окремий науковий інтерес становлять стратегії FEFO, FIFO, LIFO та HIFO, які традиційно застосовуються в управлінні запасами, логістиці й обліку, але можуть бути адаптовані для формування портфеля проєктів за принципом часової або ціннісної актуальності. Автори також пропонують модель «Компас», що дозволяє визначати пріоритетність проєктів з урахуванням ресурсних обмежень, ризиків, очікуваних вигід і відповідності стратегічним цілям. Таким чином, ефективне управління дорожньо-будівельними компаніями має базуватися на поєднанні проєктного, програмного й портфельного підходів із використанням сучасних аналітичних інструментів, орієнтованих на прибутковість, якість та задоволення потреб стейкхолдерів.

У роботі [12] автор обґрунтував логістичну стратегію забезпечення економічної безпеки транспортних підприємств із використанням економіко-математичного моделювання. Запропоновано модель формування логістичної стратегії для дорожньо-ремонтних і експлуатаційних робіт, яка враховує інформаційне середовище, сценарії реалізації та критерії прийняття рішень. Її застосування дозволяє ефективно розв’язувати проблемні ситуації та може бути корисним для розроблення стратегій формування портфеля проєктів у дорожньому будівництві.

Авторами у [13] розкрито сутність поняття портфеля IT-замовлень і доведено необхідність управління портфелем проєктів на рівні підприємства. Автори проаналізували найпоширеніші концепції управління портфелями IT-проєктів, зокрема матриці BCG та Маккінзі, процес Stage-Gate, стратегічне управління та бенчмаркінг, визначивши їхні ключові переваги. Отримані результати становлять методологічну основу для адаптації зазначених підходів до формування портфелів проєктів у сфері дорожнього будівництва.

У роботі [14] дослідники наголошують, що застосування проєктного підходу на стратегічному рівні дозволяє оптимізувати управлінські процеси й забезпечити узгодженість між довгостроковими цілями та поточними завданнями транспортних компаній. Запровадження стратегічного планування розвитку підприємств на засадах портфельного управління сприяє формуванню гнучкої системи прийняття рішень. Класична модель стратегічного управління, що включає аналіз середовища, оцінку сильних і слабких сторін, формування та реалізацію альтернатив, може бути ефективно адаптована до потреб транспортного комплексу. Однак дослідження показують, що основною проблемою залишається розрив між плануванням і реалізацією стратегій через відсутність чітких механізмів контролю. Тому сучасні транспортні підприємства мають розробляти стратегічні плани через призму проєктів, програм і портфелів, що забезпечить системність, ефективність і сталість управління.

Авторами у [15] проведено аналіз застосування проєктно-орієнтованого управління на підприємствах різних галузей економіки, зокрема транспортної. Обґрунтовано доцільність формування гібридних портфелів проєктів для автотранспортних підприємств та розроблення відповідного методу управління. Запропонований підхід включає чотири етапи та дванадцять взаємопов’язаних управлінських процесів, що враховують специфіку діяльності підприємств і особливості їх проєктного середовища. На відміну від традиційних методів, він передбачає використання досвіду реалізації попередніх гібридних проєктів. У моделі враховано доступність ресурсів, зокрема транспортних засобів, підрядників та інфраструктури, а також можливість моделювання сценаріїв для оцінювання вартості проєктів і рівня задоволеності стейкхолдерів. Збалансування портфеля гібридних проєктів пропонується здійснювати на основі кластерної моделі, що дозволяє визначати пріоритетні ініціативи з максимальною цінністю для зацікавлених сторін.

У роботі [16] відзначено, що за останні десятиліття управління портфелями проєктів пройшло шлях від емпіричної практики до високотехнологічної системи, що активно використовує інформаційні технології. Сформовано низку міжнародних стандартів і методичних рекомендацій, а також створено десятки спеціалізованих програмних продуктів. Ефективність управління портфелем значною мірою залежить від вибору управлінського підходу та рівня зрілості організації у цій сфері. У дослідженні запропоновано метод вибору підходу до управління портфелем проєктів на основі двох критеріїв, зокрема рівня ризиків та витрат, пов'язаних із його впровадженням. Застосування цього підходу на прикладі українського технічного університету показало, що комп'ютеризація процесів управління здатна суттєво знизити ризики невиконання портфельних процесів і скоротити витрати. Використання програмних систем, зокрема Jira Portfolio, дозволяє підвищити якість управлінських рішень і майже вдвічі зменшити ризики, пов'язані з неефективним виконанням портфеля проєктів.

Отже, узагальнення результатів огляду літератури свідчить, що ефективне управління портфелем проєктів у дорожньому будівництві є важливим чинником підвищення результативності галузі в умовах обмежених ресурсів і високої динаміки середовища. Виявлено, що традиційні підходи до відбору та пріоритизації проєктів не повною мірою враховують комплекс взаємозалежних факторів, зокрема часових, фінансових, регуляторних і технологічних. Тому актуальним є розробка гнучких і адаптивних методів управління, здатних забезпечити збалансованість портфеля за критеріями ефективності, ризику та стратегічної відповідності. Такі підходи мають сприяти раціональному використанню ресурсів і підвищенню стійкості реалізації інфраструктурних ініціатив.

Мета дослідження полягає у підвищенні результативності і ефективності управління портфелями проєктів в галузі дорожнього будівництва шляхом розробки методів управління ними.

Об'єкт дослідження – процес управління портфелями проєктів в галузі дорожнього будівництва.

Предмет дослідження – підходи, моделі та методи формування портфелю проєктів та управління ним.

Виклад основного матеріалу дослідження. Необхідність розробки ефективних методів формування та управління портфелем проєктів у дорожньому будівництві обумовлена складністю сучасних умов розвитку галузі, обмеженістю ресурсів і високою динамікою зовнішнього середовища [17]. Існуючі підходи до відбору й реалізації проєктів переважно не враховують взаємозв'язок між економічними, часовими, технічними та стратегічними параметрами, що призводить до неузгодженості рішень і втрати ефективності.

Для підвищення результативності управління необхідно створити методи, які поєднують аналітичні, логістичні та цифрові інструменти, здатні враховувати специфіку дорожньо-будівельних проєктів. Такі методи мають забезпечувати раціональне використання ресурсів, балансування портфеля за критеріями ефективності, ризику та стратегічної доцільності. Особливої актуальності набуває впровадження інформаційно-аналітичних систем, що дозволяють здійснювати моделювання сценаріїв і прогнозування результатів у реальному часі.

З огляду на мінливість зовнішнього середовища, сезонність робіт, обмежені строки реалізації та складність нормативних процедур, традиційні методи формування портфеля проєктів, засновані лише на експертних оцінках, не забезпечують достатньої гнучкості. Такі підходи часто ігнорують взаємозалежність між термінами дії дозвільних документів, доступністю фінансування, будівельними циклами та соціальною значущістю об'єктів. З цієї точки зору застосування логістичних стратегій, адаптованих до особливостей проєктного середовища, постає як ефективна альтернатива.

Тому розробка методу формування портфеля проєктів дорожнього будівництва ґрунтується на основі логістичних принципів, що поєднують системний підхід, адаптивність і прозору логіку прийняття рішень. Запропонований метод дозволяє формувати пріоритети не лише з технічної, а й з економічної, соціальної та регуляторної позицій, враховуючи рівень терміновості й ресурсні обмеження. На рис. 1 представлена схема реалізації такого підходу [18], яка слугує основою для

подальшої розробки алгоритму формування портфеля дорожніх проєктів у складних умовах дії ризиків і нестабільного фінансування.

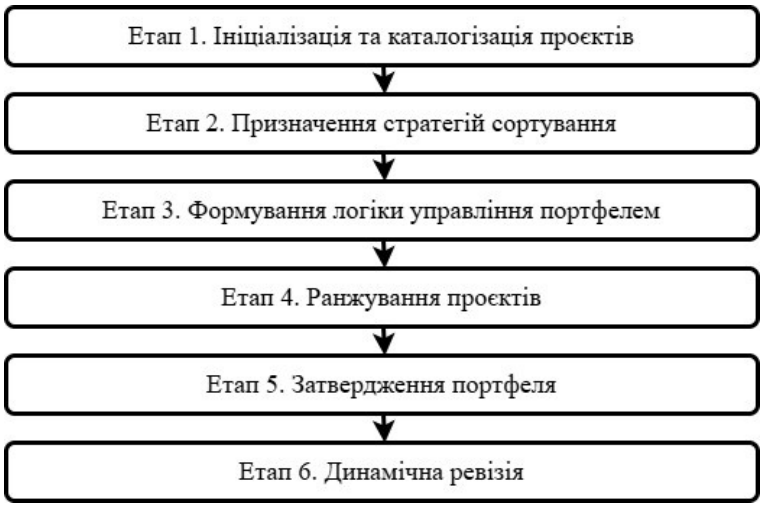


Рисунок 1 – Схема методу формування портфеля проєктів у галузі дорожнього будівництва
Figure 1 – Scheme of the method for forming a project portfolio in the field of road construction

Розглянемо більш детально кожний етап методу, який наведено на рис. 1.

Етап 1. Ініціалізація та каталогізація проєктів є базовим у процесі формування портфеля дорожньо-будівельних ініціатив, оскільки саме на цьому етапі створюється цілісна інформаційна база для подальшого аналізу, пріоритизації та управлінських рішень. Його мета полягає у виявленні, систематизації та стандартизації даних про всі наявні та потенційні проєкти, що дозволяє забезпечити прозорість і зіставність показників. На початковому кроці здійснюється збір інформації з державних і регіональних програм, проєктів місцевого значення, а також ініціатив, запропонованих органами самоврядування чи громадськістю. Далі всі проєкти описуються за уніфікованими критеріями — стадією готовності, джерелом фінансування, термінами дії дозвільної документації, соціально-економічним ефектом, рівнем ризиків тощо.

Отримані дані вносяться до електронної бази та проходять процедуру перевірки на повноту, достовірність і актуальність через зіставлення з державними реєстрами, системою ProZorro, GIS-картами та аудиторськими звітами. Після валідації здійснюється попереднє ранжування проєктів і виключення дубльованих чи неактуальних записів. Наступним кроком є класифікація ініціатив за типами, від капітального ремонту до цифровізації транспортних систем, що забезпечує можливість подальшого групування за логікою витрат, тривалості та екологічного впливу. Важливою складовою цього етапу є інтеграція даних із геоінформаційними системами, що дозволяє візуалізувати проєкти на інтерактивній карті та виявляти потенційні логістичні зв’язки між ними. Завершується етап створенням «портфельної карти», яка демонструє розподіл проєктів за типами, бюджетами, ризиками та ефективністю, слугуючи основою для стратегічного ухвалення рішень на подальших етапах управління портфелем.

Етап 2. Призначення стратегій сортування є головним у процесі формування портфеля дорожніх проєктів, адже саме на цьому етапі визначається логіка їх упорядкування, що впливає на ефективність реалізації, гнучкість управління та адаптивність до змін середовища. Після завершення каталогізації необхідно обрати стратегію або комбінацію стратегій сортування, які дозволять раціонально визначити черговість виконання проєктів з урахуванням їхньої вартості, терміновості, готовності та стратегічної важливості [2]. Авторами запропоновано використовувати чотири базові підходи – FIFO, LIFO, FEFO

та HIFO, кожен із яких має власну логіку пріоритезації: від завершення найстаріших ініціатив до реалізації найновіших або найцінніших для суспільства (табл. 1).

Таблиця 1 – Умови реалізації стратегій формування портфелю проєктів у галузі дорожнього будівництва

Table 1 – Conditions for implementing strategies for forming a project portfolio in the field of road construction

Умови	Рекомендована стратегія	Коментар
Хронічне недофінансування	HIFO	Максимізація ефективності витрат
Строки дії дозволів спливають	FEFO	Мінімізація ризику втрати погоджень
Програма реалізується 3-5 років	FIFO	Завершення розпочатого
Реакція на кризи (війна, стихія)	LIFO	Пріоритет нових критичних об'єктів
Сезонна віконність робіт	FEFO + HIFO	Максимум результату в короткі строки

Вибір стратегії залежить від конкретних умов, зокрема фінансової ситуації, строків дії дозволів, наявності зовнішнього фінансування чи надзвичайних обставин. У реальній практиці можливе комбінування стратегій, що забезпечує баланс між ефективністю, терміновістю та вигодами, наприклад, поєднання FEFO + HIFO дозволяє враховувати і строки дії документів, і економічну доцільність. Для реалізації цього процесу можуть використовуватися електронні інструменти з ваговими коефіцієнтами, що автоматизують розрахунок пріоритетів.

$$Score = 0.3 \cdot T_s + 0.4 \cdot V_e + 0.3 \cdot K_d, \quad (1)$$

де *Score* – рейтинг проєкту;
0.3, 0.4, 0.3 – вагові коефіцієнти встановлюються експертами, наприклад менеджером проєкту.
T_s – прогнозована тривалість проєкту, дн.;
V_e – прогнозований прибуток проєкту, грн.;
K_d – прогнозована кількість задач проєкту, шт.

Відповідальність за визначення стратегій розподіляється між центральними, регіональними та галузевими органами, а результати закріплюються документально для забезпечення прозорості та підзвітності. Завершальним етапом є верифікація обраної логіки сортування шляхом моделювання сценаріїв, що дозволяє оцінити вплив різних варіантів на ефективність дорожньої мережі, соціальні ефекти та бюджетні витрати.

Етап 3. Формування логіки управління портфелем передбачає створення системного підходу до організації, координації та контролю реалізації дорожніх проєктів після їх каталогізації та вибору стратегії сортування. Цей етап має вирішальне значення, оскільки визначає порядок реалізації ініціатив, механізми прийняття рішень і правила реагування на зміни зовнішнього середовища. Основою для розробки логіки управління є математична модель формування портфеля, яка забезпечує баланс між ефективністю, ризиками та стратегічною відповідністю проєктів. На цьому етапі встановлюються управлінські цілі від забезпечення безперервності транспортних зв'язків до пріоритетного відновлення критичних об'єктів, а також формуються критерії їх вимірювання за допомогою показників ефективності (KPI).

Структура портфеля може реалізовуватись за рівнями пріоритетності (Tier I-III), за фазами запуску чи за часовими групами, що дозволяє керувати реалізацією проєктів хвилями. Урахування фінансових обмежень здійснюється через планування бюджетних лімітів, аналіз співвідношення вигід і витрат (BCR) та відбір найбільш економічно доцільних ініціатив. Логіка управління має бути адаптивною, що забезпечує можливість оперативного переміщення проєктів між фазами або їх призупинення залежно від змін безпекової чи фінансової ситуації. Для цього застосовуються методи сценарного моделювання, наприклад, при дефіциті бюджету чи появі нових джерел фінансування.

Реалізація логіки управління передбачає алгоритм із п’яти кроків: групування проєктів, формування блоків, встановлення контрольних точок, узгодження з бюджетом і запуск першої хвилі з подальшим моніторингом. Цифрові інструменти, зокрема ERP, GIS, BI-системи, MS Project або Jira, забезпечують інтеграцію аналітики, фінансів і контролю виконання. Практичні результати свідчать, що застосування комбінованих стратегій (наприклад, FEFO + HIFO) дозволяє скоротити витрати, підвищити прозорість та покращити узгодженість рішень із регіональними стратегіями розвитку дорожньої інфраструктури.

Етап 4. Ранжування проєктів є основним елементом процесу формування портфеля, адже саме на цьому етапі визначається черговість реалізації дорожньо-будівельних ініціатив відповідно до обраної стратегії чи їх комбінації. Основною метою є створення обґрунтованої системи пріоритезації, що дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси, уникати втрат фінансування, прострочення дозвільної документації та дублювання зусиль. Процес ранжування ґрунтується на принципах об’єктивності, прозорості, гнучкості та рівності доступу, тобто усі проєкти оцінюються за єдиною системою показників і критеріїв (табл. 2).

Таблиця 2 – Основні критерії ранжування проєктів у галузі дорожнього будівництва
Table 2 – Main criteria for ranking projects in the field of road construction

№	Критерій	Опис
1	Дата ініціації	Визначає хронологічний порядок (важливо для FIFO)
2	Термін дії дозволів	Важливий для FEFO, дозволяє уникнути втрати чинності
3	Орієнтовна вартість	Визначає масштаб проєкту (актуально для HIFO)
4	Очікуваний соціальний ефект	Наприклад, вплив на кількість населення, яке користується дорогою
5	Стратегічна важливість	Наприклад, розташування біля важливих об’єктів: лікарні, логістичні хаби
6	Готовність проєктної документації	Чи є експертиза, підрядники, ТЕО
7	Прив’язка до воєнних або надзвичайних потреб	Особливо актуально під час війни

Для оцінювання проєктів використовуються основні параметри: дата ініціації, термін дії дозволів, вартість, соціальний ефект, стратегічна важливість, готовність документації та відповідність воєнним або надзвичайним потребам. Ранжування може здійснюватися за допомогою різних моделей від простого табличного підрахунку балів до багатокритеріальних методів (AHP, TOPSIS, SMART), які враховують вагові коефіцієнти кожного критерію. Автоматизація цього процесу можлива через інтеграцію в ERP-системи, Power BI чи спеціалізовані ПЗ, що дозволяє динамічно оновлювати рейтинги.

Замість звичайного списку доцільно формувати пріоритетні блоки (Tier I-III), які структурують портфель за ступенем критичності та строками реалізації. Візуалізація результатів у вигляді таблиць, графіків, теплових карт або GIS-мап забезпечує швидке розуміння стану портфеля як управлінцями, так і технічними фахівцями. Важливо, що система ранжування є адаптивною: вона передбачає

можливість коригування у разі змін фінансування, законодавства чи безпекової ситуації. Приклад практичного застосування показав, що таке ранжування допомагає сфокусувати ресурси на найбільш значущих проєктах, підвищуючи ефективність використання бюджету та стійкість дорожньої мережі.

Етап 5. Затвердження портфеля є завершальним кроком підготовчого циклу управління портфелем дорожніх проєктів і має важливе значення для переходу від планування до практичної реалізації. На цьому етапі результати попередніх процедур, зокрема ініціалізації, ранжування, вибору стратегій і логіки управління, набувають офіційного статусу. Затвердження портфеля забезпечує правові та організаційні підстави для фінансування, укладання контрактів, запуску тендерів і початку будівельно-монтажних робіт. Процес затвердження відбувається на різних рівнях – державному, регіональному або місцевому із залученням профільних органів, таких як Мінрозвитку, Укравтодор, служби відновлення інфраструктури та органи місцевого самоврядування.

Залежно від масштабу проєктів і джерел фінансування, портфель може затверджуватися наказом, рішенням комісії, включенням до бюджетної програми або укладенням міжінституційної угоди. Одночасно визначаються джерела фінансування, обсяги співфінансування та графіки використання ресурсів. Важливою складовою цього етапу є розподіл відповідальності між учасниками процесу від органів управління до підрядників, із чітким визначенням KPI та процедур звітності. Після ухвалення портфель підлягає публічному оприлюдненню через офіційні сайти, GIS-карти або інформаційні панелі, що забезпечує прозорість і громадський контроль. Для гарантування легітимності процесу доцільно закріпити його нормативно шляхом прийняття регламенту формування, оновлення та моніторингу портфеля, що робить систему управління не лише формальною, а й підзвітною та контрольованою.

Етап 6. Динамічна ревізія є важливим механізмом підтримання актуальності та стійкості портфеля проєктів у галузі дорожнього будівництва. На відміну від статичного планування, цей етап передбачає постійний перегляд складу та структури портфеля залежно від змін зовнішнього середовища, фінансових умов, законодавства чи безпекової ситуації. Динамічна ревізія забезпечує адаптивність системи управління, дозволяючи оперативно реагувати на кризові події, появу нових джерел фінансування або зміну державних пріоритетів. Вона може мати плановий, ситуаційний або оперативний характер від регулярних оновлень до екстрених рішень у разі форс-мажорів чи руйнування об’єктів.

Процес ревізії включає моніторинг зовнішнього середовища, аналіз актуальності проєктів, оновлення коефіцієнтів ранжування, ротацію між пріоритетними категоріями та узгодження змін із відповідними органами управління. Для підтримки цього процесу використовуються сучасні цифрові інструменти, зокрема BI-системи для візуалізації, ERP/PPM для оновлення графіків, CRM для погоджень і GIS для просторового відображення стану мережі. Важливою складовою є сценарне моделювання, що дозволяє проактивно планувати дії за різних сценаріїв від скорочення фінансування до прискореного запуску проєктів. Усі зміни документуються у вигляді актів, протоколів або звітів, що гарантує юридичну послідовність, прозорість процесу та довіру з боку донорів, громадськості й контролюючих структур.

Запропонований метод формування портфелю проєктів у галузі дорожнього будівництва забезпечує системний, адаптивний та прозорий підхід до формування, реалізації й контролю інфраструктурних ініціатив. Його етапна структура від ініціалізації до динамічної ревізії дозволяє комплексно враховувати стратегічні, фінансові, соціальні та ризикові чинники розвитку галузі. Використання логістичних стратегій і цифрових інструментів підвищує точність прийняття управлінських рішень і сприяє ефективному використанню ресурсів. Метод створює умови для своєчасного реагування на зміни зовнішнього середовища, зокрема в умовах воєнного стану та обмеженого фінансування. У результаті підвищується ефективність реалізації дорожніх проєктів, зміцнюється стійкість транспортної інфраструктури та забезпечується досягнення стратегічних цілей регіонального розвитку.

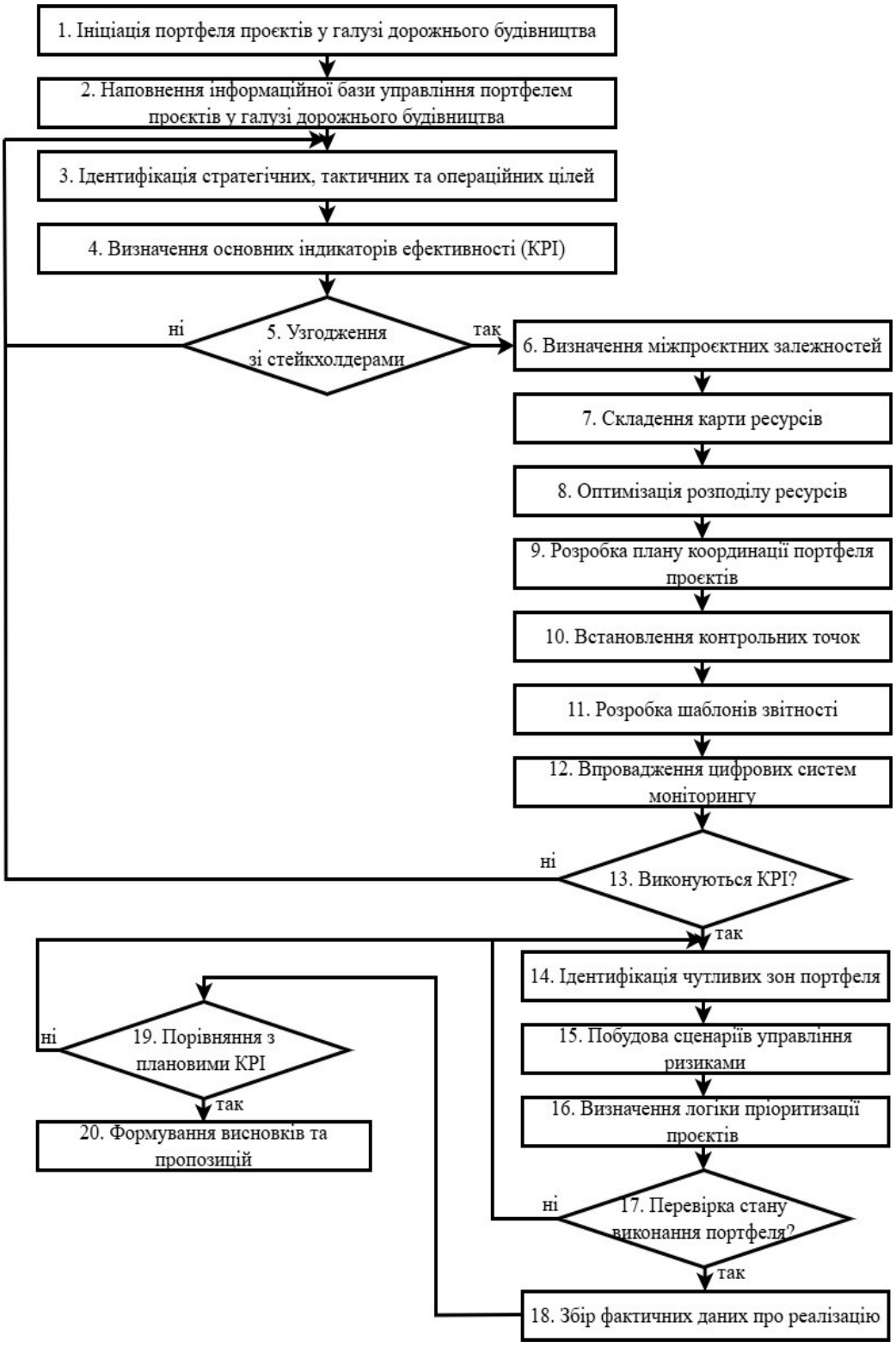


Рисунок 2 – Метод управління портфелем проєктів у галузі дорожнього будівництва
Figure 2 – Project portfolio management method in the road construction sector

Після розробки методу формування портфеля проєктів у галузі дорожнього будівництва, наступним логічним кроком є забезпечення ефективного управління його реалізацією. В умовах сучасних викликів, що притаманні галузі дорожнього будівництва в Україні, зокрема воєнних ризиків, фінансової нестабільності, змін нормативного середовища, управління портфелем має бути гнучким, динамічним і системно організованим. Основна мета цього процесу полягає у забезпеченні узгодженості між окремими проєктами, контролі за їх виконанням, своєчасному реагуванні на зміни та досягненні запланованих результатів у межах визначених ресурсів і термінів.

Портфель у цьому випадку розглядається не як сукупність ізольованих ініціатив, а як цілісна система, в якій усі проєкти взаємодіють задля реалізації спільної стратегії розвитку транспортної інфраструктури. Управління портфелем на етапі реалізації дозволяє забезпечити сталість інфраструктурної політики, підвищити ефективність використання бюджетних коштів і зменшити вплив зовнішніх ризиків. Саме авторами запропоновано метод управління портфелем проєктів у галузі дорожнього будівництва на етапі реалізації (рис. 2) [19], який спрямований на підвищення узгодженості, прозорості та результативності процесів реалізації дорожніх проєктів.

1. Ініціація портфеля проєктів у галузі дорожнього будівництва. На цьому етапі офіційно визначається потреба у впровадженні портфельного підходу до управління дорожніми проєктами. Створюється ініціативна група або відповідальний орган, який формує попередню структуру портфеля та окреслює його фінансові рамки. Водночас проводиться базова оцінка масштабів робіт, територіального охоплення та ключових ризиків реалізації.

2. Наповнення інформаційної бази управління портфелем проєктів. Здійснюється збір і систематизація детальної інформації про кожен проєкт, зокрема технічні характеристики, стадію реалізації, джерела фінансування, ризики та очікувані результати. Всі дані уніфікуються у єдиному форматі для зручності подальшої обробки та аналітики. Інформаційна база створюється з можливістю інтеграції у цифрові інструменти, такі як Power BI чи Excel.

3. Ідентифікація стратегічних, тактичних та операційних цілей. Визначаються цілі управління портфелем на різних рівнях від стратегічного (розвиток транспортної мережі) до операційного (ефективне використання ресурсів). Цілі формулюються у взаємозв'язку, що забезпечує логічну послідовність дій на всіх етапах реалізації. Такий підхід дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів і досягати поставлених результатів без втрати пріоритетів.

4. Визначення ключових індикаторів ефективності (KPI). На цьому етапі формуються кількісні показники, які відображають ступінь досягнення цілей портфеля. До них можуть належати відсоток виконання робіт, кількість введених у експлуатацію кілометрів доріг чи рівень освоєння фінансування. KPI визначаються за принципом SMART і використовуються для постійного моніторингу прогресу.

5. Узгодження зі стейкхолдерами. Підготовлені результати попередніх етапів представляються зацікавленим сторонам, зокрема органам влади, громадам, донорам та підрядникам. Мета узгодження полягає у досягненні спільного бачення, підвищенні прозорості та мінімізації ризиків конфліктів. Якщо погодження не досягнуто, відбувається повернення до попередніх етапів для коригування цілей або KPI.

6. Визначення міжпроєктних залежностей. Проводиться аналіз технічних, логістичних, фінансових і нормативних зв'язків між проєктами портфеля. Це дозволяє уникнути дублювання робіт, перевантаження ресурсів і взаємних затримок у реалізації. Результатом є створення матриці залежностей, яка використовується під час планування виконання.

7. Складання карти ресурсів. Здійснюється інвентаризація наявних ресурсів, зокрема технічних, фінансових, людських і часових. Визначаються доступні підрядні організації, обсяги фінансування та строки виконання робіт. Результати оформлюються у вигляді аналітичної карти, що показує розподіл ресурсів у територіальному та часовому розрізі.

8. Оптимізація розподілу ресурсів. На основі складеної карти розробляється оптимальний графік використання ресурсів між проєктами. Застосовуються аналітичні моделі, що дозволяють мінімізувати простої та уникнути конфліктів у графіках робіт. Таким чином, формується календарно-ресурсна модель реалізації портфеля.

9. Розробка плану координації портфеля проєктів. Створюється документ, який регламентує взаємодію між усіма учасниками портфеля від органів управління до виконавців. У ньому визначаються правила обміну інформацією, погодження рішень і частота комунікацій. Такий план підвищує узгодженість дій і запобігає дублюванню функцій.

10. Встановлення контрольних точок (milestones). Визначаються основні етапи реалізації, серед яких можна виділити такі: завершення проєктування, початок будівництва, введення об'єкта в експлуатацію. Контрольні точки фіксують прогрес і дозволяють своєчасно виявляти відставання чи ризики. Вони відображаються у графіках Ганта або електронних звітах для зручності контролю.

11. Розробка шаблонів звітності. Формуються стандартизовані форми звітів, що уніфікують подання інформації про стан виконання проєктів. Шаблони охоплюють фінансові, технічні та часові показники, а також рівень ризиків. Єдиний формат звітності забезпечує порівнюваність результатів і підвищує об'єктивність оцінювання.

12. Впровадження цифрових систем моніторингу. Використовуються аналітичні платформи (Power BI, ArcGIS, Qlik), що дозволяють відстежувати стан реалізації у режимі реального часу. Це дає змогу швидко реагувати на відхилення та формувати візуальні аналітичні панелі. Інтеграція цифрових систем сприяє підвищенню прозорості та оперативності управління.

13. Виконуються KPI? Проводиться аналіз досягнення ключових індикаторів ефективності порівняно з плановими показниками. У разі відповідності управління триває за встановленим планом. Якщо виявлено значні відхилення, здійснюється перегляд цілей і оновлення логіки реалізації.

14. Ідентифікація чутливих зон портфеля. Визначаються проєкти або ділянки, які мають найбільшу залежність від ризиків зовнішнього чи внутрішнього характеру. До таких зон належать, наприклад, об'єкти в районах бойових дій або з високими екологічними ризиками. Виявлення цих точок дозволяє зосередити ресурси на зменшенні вразливості портфеля.

15. Побудова сценаріїв управління ризиками. Для кожної критичної зони розробляються альтернативні сценарії реагування. Наприклад, при затримці фінансування запускається резервний графік або етапна реалізація. Кожен сценарій має чітко визначені умови активації, ресурси та очікувані результати.

16. Визначення логіки пріоритизації проєктів. Формується алгоритм, який визначає черговість реалізації проєктів залежно від їх значущості та обмежень. Використовуються логістичні моделі, зокрема FIFO, LIFO, FEFO, HIFO, для об'єктивного розподілу пріоритетів. Такий підхід забезпечує збалансованість між стратегічною важливістю та ефективністю використання ресурсів.

17. Перевірка стану виконання портфеля. Регулярно проводиться оцінка загального прогресу портфеля, зокрема дотримання строків, цілей і бюджетів. Якщо показники відповідають очікуванням, управління триває у плановому режимі. У разі виявлення проблем здійснюється повторна оцінка ризиків і оновлення сценаріїв реагування.

18. Збір фактичних даних про реалізацію. Здійснюється документування усіх виконаних робіт, фінансових операцій і результатів. Використовуються цифрові засоби, зокрема фотофіксація, супутниковий моніторинг, електронна звітність. Отримані дані формують аналітичну основу для прийняття управлінських рішень.

19. Порівняння з плановими KPI. Виконується порівняльний аналіз фактичних результатів з плановими показниками ефективності. Це дозволяє оцінити відповідність витрат, термінів і результатів запланованим очікуванням. Якщо спостерігаються відхилення, проводиться перегляд ризиків і корекція пріоритетів.

20. Формування висновків і пропозицій. Підсумковим результатом стає аналітичний звіт, що містить оцінку досягнень і рекомендації для майбутніх циклів управління. Звіт узагальнює уроки, проблеми та резерви підвищення ефективності. Він також використовується як основа для стратегічного планування галузі на національному рівні.

Отже, ефективне управління портфелем проєктів у дорожньому будівництві на етапі реалізації передбачає не лише виконання планів і дотримання фінансових лімітів, а й постійну комунікацію між учасниками, оперативне реагування на зміни зовнішнього середовища та активне використання

цифрових технологій моніторингу. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти відхилення, оптимізувати ресурси та підтримувати узгодженість усіх дій. Запропонований метод базується на поєднанні стратегічного управління з гнучкими механізмами адаптації до реальних умов. Це забезпечує стійкість дорожніх проєктів навіть у ситуаціях невизначеності чи ризику. Упровадження такого підходу сприяє підвищенню ефективності управління, зміцненню транспортної інфраструктури та підвищенню безпеки дорожнього руху.

Висновки. У ході дослідження узагальнено наукові підходи до управління портфелями проєктів у галузі дорожнього будівництва, що дало змогу визначити ключові тенденції розвитку цієї сфери. Огляд літератури показав, що наявні підходи, моделі та методи портфельного управління здебільшого орієнтовані на промислові чи інформаційні галузі й не враховують специфіки дорожньої інфраструктури, зокрема високої залежності від зовнішніх чинників, сезонності робіт, нормативних обмежень і складної системи стейкхолдерів. Водночас у сучасних умовах через наявність воєнних ризиків, обмеженого фінансування та прискореної цифровізації, потреба у розробці гнучких, адаптивних і науково-обґрунтованих методів управління портфелями проєктів у галузі дорожнього будівництва є особливо актуальною.

Метод формування портфеля проєктів у галузі дорожнього будівництва дозволяє системно структурувати ініціативи, визначати їхню пріоритетність і забезпечувати збалансоване використання ресурсів. Його поетапна логіка охоплює ініціалізацію, каталогізацію, застосування логістичних стратегій сортування (FIFO, LIFO, FEFO, HIFO), визначення логіки управління, ранжування, затвердження та динамічну ревізію. Такий підхід забезпечує прозорість прийняття рішень, підвищує ефективність фінансування й дозволяє адаптувати портфель до змін соціально-економічного та політичного середовища. Він створює основу для побудови цифрових аналітичних систем управління дорожніми проєктами на регіональному й національному рівнях.

Метод управління портфелем проєктів на етапі реалізації спрямований на забезпечення узгодженості, моніторингу та результативності виконання дорожніх ініціатив. Його сутність полягає у поєднанні стратегічного бачення з оперативною адаптивністю, що дозволяє ефективно реагувати на ризики, контролювати KPI, управляти ресурсами та підтримувати синергію між проєктами. Інтеграція цифрових інструментів (Power BI, ArcGIS, ERP, CRM) робить управління портфелем динамічним, прозорим і доказовим.

Запропоновані методи у сукупності формують цілісну систему управління портфелями проєктів у дорожньому будівництві, яка сприяє сталому розвитку транспортної інфраструктури України, підвищенню ефективності використання бюджетних коштів і зміцненню національної безпеки.

Отже, проведене дослідження доводить, що ефективне управління портфелем проєктів у галузі дорожнього будівництва є необхідною умовою підвищення результативності державної інфраструктурної політики. Запропоновані методи формування та реалізації портфеля забезпечують системність, гнучкість і прозорість управлінських процесів, поєднуючи стратегічне планування з цифровими технологіями моніторингу. Їх впровадження створює підґрунтя для сталого розвитку транспортної інфраструктури України, підвищення конкурентоспроможності галузі та забезпечення безпеки дорожнього руху в умовах сучасних викликів.

Подальші дослідження в межах розробки моделей та методів управління портфелями проєктів в галузі дорожнього будівництва будуть спрямовані на розробку інформаційної технології за допомогою якої вони мають реалізуватися.

Перелік посилань

1. Куліков О.М. Сучасні підходи до управління портфелями проєктів в галузі дорожнього будівництва. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами*. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 1(7). С. 42-50. DOI: https://www.doi.org/10.20998/2413-3000.2023.7.6. URL: http://pm.khpi.edu.ua/article/view/289196

2. Куліков О.М., Морозова Г.С. Концептуальна модель формування портфелів проєктів у галузі дорожнього будівництва. Управління розвитком складних систем. Київ, 2024. Вип. 58. С. 42-52. DOI: https://www.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.58.42-52

3. ДСТУ ISO 21502:2025 (ISO 21502:2020, IDT) Керування проєктами, програмами та портфелями. Настанова щодо керування проєктами. Наказ ДП «УкрНДНЦ» (НОС) від 18.07.2025 № 134. URL: https://uas.gov.ua/standardization/nakazy/2025/july?page_size=10

4. ДСТУ ISO 21504:2025 (ISO 21504:2022, IDT) Керування проєктами, програмами та портфелем. Настанова щодо керування портфелями. Наказ ДП «УкрНДНЦ» (НОС) від 18.07.2025 № 134. URL: https://uas.gov.ua/standardization/nakazy/2025/july?page_size=10

5. Arsanjani M.A., Ershadi M. (2021). Avenues to improving the effectiveness of project portfolio management in the construction industry. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 17(4), 259–268. https://doi.org/10.1080/17509653.2021.2009053

6. Городецька Т.Е., Ковальков С.Д., Росохатий С.А. Стратегічне управління проєктами в транспортному комплексі в контексті сталого розвитку. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2025. Т. 10, № 2. С. 50-54. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-2-8

7. Івко А. В. Управління проєктами відновлення дорожньої інфраструктури і портфельний підхід. *Вісник НТУ. Серія: Технічні науки*. 2022. Вип. 3(53). С. 433-442. DOI: https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-3-53-433-442

8. Emefu E. C., Ghaffar A., Nenseth E., Sund K. (2024). Portfolio Management of Infrastructure Projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1389, 012031. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1389/1/012031

9. Lou B., Afshari M., Johansen A., Nygaard Rasmussen F., Bohne R.A. (2025). Sustainability in Infrastructure Project Management – Analysis of Two European Megaprojects. *Infrastructures*, 10(5), 113. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures10050113

10. Топазли Р. Інституційні механізми публічного управління розвитком будівельної галузі в умовах децентралізації. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2025. Том 340. № 2. С. 26-32. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-340-3

11. Куліков О.М., Оксамитна Л.П. Огляд стратегій складської логістики для формування портфелів проєктів в галузі дорожнього будівництва. *Project, Program, Portfolio Management (P3M-2023)*. Тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 1-2 грудня 2023 року). Том 1. Одеса : ІШІР, 2023. С. 23-28. URL: https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/5512

12. Вівчар О.І. Формування логістичної стратегії системи економічної безпеки підприємств транспорту із застосуванням апарату економіко-математичного моделювання. *Review of transport economics and management*. 2019. Вип. 1(17). С. 89-95. DOI: https://doi.org/10.15802/rtemt.v0i1(17).176490

13. Івченкова О.Ю., Лях А.О. Аналіз концепцій управління портфелем замовлень ІТ-підприємства. *Економічний вісник Донбасу*. 2018. № 1(51). С. 83-86. URL: http://www.evd-journal.org/download/2018/1(51)/pdf/13-Ivchenkova.pdf

14. Харута В.С., Марунич В.С., Харута В.Л., Григоревська М.Я. Стратегічне управління проєктами транспортної галузі. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2021. № 45. С. 57-65. DOI: https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.57-65

15. Тригуба А.М., Кондисюк І.В., Коваль Н.Я. Формування портфелів гібридних проєктів автотранспортних підприємств. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. Харків, 2021. № 2(4). С. 67-72. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-3000.2021.4.9

16. Кононенко І.В. Кподжедо М.Ф.К. Метод вибору підходу для управління портфелем проєктів і його застосування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. Харків, 2022. № 1(5). С. 29-38. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.5.3

17. A Guide to the Project Management Body of Knowledge. (7 Ed.). Chicago: Project Management Institute, 2019. 274 p.

18. Куліков О.М., Бедрій Д.І. Метод формування портфелів проєктів у галузі дорожнього будівництва. *Управління проєктами у розвитку суспільства:* тези допов. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 23 травня 2025 року). Київ: КНУБА, 2025. С. 152-156.

19. Куліков О.М., Бедрій Д.І. Метод управління портфелем проєктів у сфері дорожнього будівництва. *Інформаційні системи та інноваційні технології управління проєктами і програмами*: тези допов. міжнар. наук.-практ. конф. (смт. Коблево, 15-20 вересня 2025 року). Харків-Коблево, 2025. С. 168-171.

METHODS OF PROJECT PORTFOLIO MANAGEMENT IN THE ROAD CONSTRUCTION INDUSTRY

Danchenko Olena. B., Dr.Sci.Tech., Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, elen_danchenko@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-5657-9144.

Kulikov Oleg. M., Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, http://orcid.org/0000-0003-2675-4946.

Abstract. The relevance of the research topic is due to the need to improve and further develop methodological approaches to project portfolio management, in terms of the formation of the latter taking into account the characteristics of the road construction industry.

The purpose of the research is to increase the effectiveness and efficiency of project portfolio management in the road construction industry by developing methods for managing them.

The object of the research is the process of managing project portfolios in the road construction industry.

The subject of the research is approaches, models and methods for forming and managing a project portfolio.

Research methodology. The research was conducted on the basis of the practice of applying the project approach and portfolio-oriented management in the road construction industry. When forming the conceptual basis of the research, as well as analyzing scientific works, the method of scientific identification and comparative analysis was used; when developing a method for forming a project portfolio in the road construction industry - FEFO, FIFO, LIFO and HIFO inventory management strategies; when developing a method for managing project portfolios in the road construction industry - a systems approach, strategic management.

Keywords: system approach, strategic management, project portfolio, project portfolio management, portfolio-oriented management, project portfolio formation, road construction.

References

[1] Kulikov O.M. (2023). Modern approaches to project portfolio management in the field of road construction. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management. Kharkiv: NTU "KhPI". No. 1(7). P. 42-50. DOI: https://www.doi.org/10.20998/2413-3000.2023.7.6. URL: http://pm.khpi.edu.ua/article/view/289196

[2] Kulikov O.M., Morozova G.S. (2024). Conceptual model of project portfolio formation in the field of road construction. Management of complex systems development. Is. 58. P. 42-52. DOI: https://www.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.58.42-52

[3] DSTU ISO 21502:2025 (ISO 21502:2020, IDT) Project, program and portfolio management. Guidance on project management. Order of the State Enterprise "UkrNDNC" (NOS) dated 18.07.2025 No. 134. URL: https://uas.gov.ua/standardization/nakazy/2025/july?page_size=10

[4] DSTU ISO 21504:2025 (ISO 21504:2022, IDT) Project, program and portfolio management. Guidance on portfolio management. Order of the State Enterprise "UkrNDNC" (NOS) dated 18.07.2025 No. 134. URL: https://uas.gov.ua/standardization/nakazy/2025/july?page_size=10

[5] Arsanjani M.A., Ershadi M. (2021). Avenues to improving the effectiveness of project portfolio management in the construction industry. International Journal of Management Science and Engineering Management, 17(4), 259-268. https://doi.org/10.1080/17509653.2021.2009053

[6] Gorodetska T.E., Kovalkov S.D., Rosokhaty S.A. (2025). Strategic project management in the transport complex in the context of sustainable development. Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology. Vol. 10, No. 2. P. 50-54. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-2-8

[7] Ivko A.V. (2022). Management of road infrastructure restoration projects and the portfolio approach. Bulletin of NTU. Series: Technical Sciences. Is. 3(53). P. 433-442. DOI: https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-3-53-433-442

[8] Emefu E.C., Ghaffar A., Nenseth E., Sund K. (2024). Portfolio Management of Infrastructure Projects. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1389, 012031. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1389/1/012031

[9] Lou B., Afshari M., Johansen A., Nygaard Rasmussen F., Bohne R.A. (2025). Sustainability in Infrastructure Project Management – Analysis of Two European Megaprojects. Infrastructures, 10(5), 113. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures10050113

[10] Topazly R. (2025). Institutional mechanisms of public management of the development of the construction industry under decentralization. Bulletin of Khmelnytsky National University. Economic Sciences. Vol. 340. No. 2. P. 26-32. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-340-3

[11] Kulikov O.M., Oksamytna L.P. (2023). Review of warehouse logistics strategies for forming project portfolios in the field of road construction. Project, Program, Portfolio Management (P3M-2023). Abstracts of the 8th International Scientific and Practical Conference (Odessa, December 1-2, 2023). Vol. 1. P. 23-28. URL: https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/5512

[12] Vivchar O.I. (2019). Formation of a logistics strategy for the economic security system of transport enterprises using the apparatus of economic and mathematical modeling. Review of transport economics and management. Is. 1(17). P. 89-95. DOI: https://doi.org/10.15802/rtemt.v0i1(17).176490

[13] Ivchenkova O.Yu., Lyakh A.O. (2018). Analysis of concepts for managing the order portfolio of an IT enterprise. Economic Bulletin of Donbas. No. 1(51). P. 83-86. URL: http://www.evd-journal.org/download/2018/1(51)/pdf/13-Ivchenkova.pdf

[14] Kharuta V.S., Marunych V.S., Kharuta V.L., Hryhorevska M.Ya. (2021). Strategic management of transport industry projects. Management of complex systems development. No. 45. P. 57-65. DOI: https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.57-65

[15] Tryguba A.M., Kondysyuk I.V., Koval N.Ya. (2021). Formation of portfolios of hybrid projects of motor transport enterprises. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, management of portfolios, programs and projects. No. 2(4). P. 67-72. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-3000.2021.4.9

[16] Kononenko I.V. Kpozhedo M.F.K. (2022). Method of choosing an approach for project portfolio management and its application. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, management of portfolios, programs and projects. No. 1(5). P. 29-38. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.5.3

[17] A Guide to the Project Management Body of Knowledge. (7 Ed.). Chicago: Project Management Institute, 2019. 274 p.

[18] Kulikov O.M., Bedrii D.I. (2025). Method of forming project portfolios in the field of road construction. Project management in the development of society: theses of the report of the XXII international scientific and practical conference (Kyiv, May 23, 2025). P. 152-156.

[19] Kulikov O.M., Bedrii D.I. (2025). Method of managing a project portfolio in the field of road construction. Information systems and innovative technologies for managing projects and programs: theses of the report of the international scientific-practical conference (Koblevo, September 15-20, 2025). P. 168-171.

УДК 656.07:004.65 (075)
UDC 656.07:004.65 (075)
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-503-514

АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ НАВЧАЛЬНО-СЕРТИФІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ РУХУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ УБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

ASPECTS OF IMPLEMENTATION OF AN INFORMATION TRAINING AND CERTIFICATION NETWORK SYSTEM FOR TRAFFIC SAFETY MANAGEMENT TO INCREASE THE LEVEL OF RAILWAY TRANSPORTATION SECURITY



Погорілий Олександр Вікторович, *аспірант, Національний транспортний університет, Київ, Україна,*
e-mail: avpmailx@gmail.com,

https://orcid.org/0000-0003-4824-2191

Анотація: Стаття присвячена визначенню особливостей використання та подальшого розвитку Інформаційної навчально-сертифікаційної мережевої системи управління безпекою руху для підвищення рівня убезпечення залізничних перевезень (далі – ІНСУБР). Отже ця інформаційна система була ініційована автором як спосіб реалізації в Україні Положення про систему управління безпекою на залізничному транспорті для впровадження (введено у дію у 2021 році) на підприємствах сфери залізничного транспорту, які раніше не мали у своєму складі служби безпеки руху поїздів. Розглянуто два аспекти практичного застосування та розвитку Інформаційної навчально-сертифікаційної мережевої системи управління безпекою руху для підвищення рівня убезпечення залізничних перевезень. Перший аспект – розроблено регресійно-кореляційна модель визначення взаємозалежності між рівнем навчання питанням убезпечення перевезень та рівнем безпеки з вини людського чинника. Це надасть можливість оцінити вплив людського чинника на рівень безпеки руху на підприємстві. Другий аспект - визначені п’ять напрямків подальшого розвитку ІНСУБР: 1) масштабування системи на рівні галузі - створить умови для цифрової трансформації системи управління знаннями та безпекою руху в залізничній галузі України, сприяючи зниженню інцидентності, підвищенню дисципліни та управлінської ефективності на системному рівнях; 2) інтеграція з державними інформаційно-аналітичними платформами та реєстрами, що функціонують у сфері транспорту, освіти, безпеки та трудових відносин. Це ключова умова для створення єдиного цифрового простору управління знаннями, верифікації кваліфікації та контролю за дотриманням нормативно-правових вимог у галузі. Це надасть можливість інтеграції з державними платформами ІНСУБР може стати не лише галузевим, але й міжгалузевим стандартом управління знаннями, здатним масштабуватись на інші сфери критичної інфраструктури, де безпека залежить від рівня кваліфікації персоналу; 3) розширення функціональних можливостей системи, а саме: впровадження інтерактивних VR/AR-модулів, індивідуалізовані траєкторії навчання, адаптивна система тестування, побудова цифрових карт ризиків, прогнозна аналітика; 4) інтернаціоналізація системи у контексті поступової інтеграції України

до європейського правового, інфраструктурного та освітнього простору, та адаптація до умов міжнародного ринку транспортної безпеки; 5) нормативно-правове закріплення у міжнародному та українському правовому полі. Для забезпечення довгострокової стабільності, масштабованості та інтегрованості ІНСУБР у державну інфраструктуру критично важливим є нормативно-правове закріплення її статусу. На цьому етапі розвиток системи має перейти від рівня внутрішньої ініціативи або пілотного рішення підприємства до формального визнання її частиною галузевої та національної нормативної бази. Першим кроком до цього є включення ІНСУБР до чинних нормативних документів, які регулюють систему управління безпекою руху, порядок професійної підготовки та атестації персоналу, державний нагляд і контроль за дотриманням правил експлуатації транспортної інфраструктури. Це дозволить визначити ІНСУБР як рекомендовану (на першому етапі) або обов'язкову (на наступному етапі) платформу для навчання, сертифікації та моніторингу знань працівників, що виконують функції, пов'язані з безпекою руху.

Ключові слова: безпека руху, інформаційна система, управління, транспортні технології, аналіз, статистичні методи, розвиток, рівень навчання, людський чинник, інтернаціоналізація системи/

Вступ. На початку 2021 року в Україні було прийнято нове Положення про систему управління безпекою руху на залізничному транспорті (далі – Положення про СУБР) [1]. Його дія розповсюджується на більше ніж 1500 підприємств (дані на початок повномасштабних військових дій в Україні), які у своєї діяльності використовують залізничний рухомий склад або залізничну інфраструктуру. При створенні та впровадженні СУБР на підприємстві, на якому не існувало служби з безпеки руху, виникає ряд проблем організаційного, документального, концептуального порядку: розробка класифікатора транспортних подій, положення про розслідування транспортних подій, класифікатора ризиків, фіксації порушень та ведення документації, ризик-менеджменту та багато інших.

Створення документів-аналогів АТ «Укрзалізниця» немає сенсу, тому що, по-перше, більшість позицій класифікатора транспортних подій на будь- якому підприємстві будуть відсутні; по-друге - не всі документи, які вимагає мати [1] існують і в АТ «Укрзалізниця» або відповідають вимогам, а по-третє - більшість ризиків та порушень на підприємстві не будуть співпадати з залізничною компанією, бо там впроваджено багато технічних та технологічних засобів, які підприємство не зможе впровадити з точки зору інвестицій.

Автором було розроблено Інформаційну навчально-сертифікаційну мережеву систему управління безпекою руху для підвищення рівня убезпечення залізничних перевезень (у подальшому – ІНСУБР) [2], яка крім можливості створювати необхідні документи та звіти, фіксувати порушення безпеки руху та відповідні розслідування, також реалізовувала навчання та контроль знань персоналу в інтернет-середовищі. ІНСУБР почала впроваджуватись, але виникли труднощі, які пов’язані з війною. Є також труднощі впровадження на підприємствах Положення про СУБР методичного характеру, два аспекти з яких розглянуті у даній статті.

Таким чином методичне забезпечення впровадження Положення про СУБР стає актуальною та практично значущою задачею підприємств сфери залізничного транспорту, враховуючи значимість безпеки на державному та громадському рівнях.

Матеріали та методи. Положення [1] надає всі необхідні складові СУБР, але у вигляді вимог та загального опису. Реалізовувати це Положення майже неможливо без цілої низки додаткових нормативних документів, які треба адаптувати до особливостей діяльності конкретного підприємства.

Теорія безпеки проф. Д.Петерсена [3] є базовою для фахівців менеджменту та безпеки на підприємстві. Вона надає основні принципи розробки та керування безпекою на підприємстві. Але ця робота не містить деякі ключові поняття Положення про СУБР: управління ризиками, розслідування транспортних подій. Тому ця робота є суттєвим доповненням до СУБР на підприємстві залізничної сфери.

У роботі [4] зазначена необхідність розробки системи управління ризиками. Представлені апостеріорне та апріорне значення ризику, які дозволяють охарактеризувати реальний стан безпеки

залізничного руху за досліджуваний період, та прогнозовану безпеку залізничного руху. Однак запропонована система ризиків має узагальнюючий характер, що ускладнює визначення причин порушення безпеки руху.

Автори робіт [5-6] зазначають про необхідність підтримки ризиків не вище встановленого рівня. Такий підхід сприяє прийняттю рішень, що враховують невизначеність умов, можливість настання певних подій чи обставин у майбутньому, а також їх вплив на досягнення поставлених цілей організації у сфері функціональної безпеки об'єктів інфраструктури та рухомого складу. Проте в роботах відсутній розгляд питання збору вхідної інформації для забезпечення ефективної системи ризик-менеджменту.

В [7] зазначено, що завдяки аналізу ризику, система управління підприємством здатна забезпечити безпечну та ефективну організацію діяльності. Проте в роботі відсутній конкретний опис інформації, що використовується для визначення ризиків.

Стаття [8] досить повно надає відомості про управління безпекою руху на залізничному підприємстві на основі управління технологічними ризиками. Введено поняття базової причини або передумови, що надає можливість ефективного управління безпекою руху. Але ця робота присвячена системам сигналізації, які експлуатуються АТ «УЗ» і не використовуються підприємствам за межами АТ «УЗ».

Робота [9] підкреслює, що управління ризиками в залізничній галузі має фрагментарний та епізодичний характер, що обумовлює вагомість і потребу формування системи ризик-менеджменту. Це надасть можливість удосконалити систему корпоративного управління та забезпечити прийняття більш виважених управлінських рішень. Однак в роботі представлена лише теоретична частина щодо управління ризиками на залізничному транспорті.

Управління та оцінка ризиків, згідно [10] визначається як рекомендація щодо загальних методів безпеки в якості інструменту підтримки безпеки залізничного руху саме для умов польських залізниць та підприємств, що не адекватно ситуації в Україні.

В [11] зазначено, що завдяки аналізу ризику можна підвищити рівень безпеки, забезпечити захист своїх основних фондів, клієнтів і співробітників, а також зменшити витрати на технічне обслуговування залізничних активів і вплив на навколишнє середовище. Але в проведеному дослідженні не враховуються особливості аналізу ризику в структурних підрозділах.

Робота [12] стверджує, що управління ризиками у складі СУБР зменшить кількість нещасних випадків та підвищить рівень безпеки на залізничному транспорті. Однак ідентифікація ризиків в даному дослідженні проводиться тільки на основі технічних і нетехнічних характеристик.

Враховуючи, що українське Положення про СУБР є аналогом європейського, можна було чекати знайти деякі методичні положення в європейських нормативних документах, наприклад в [13]. Але практичних рекомендацій щодо навчання персоналу не надано.

Метою роботи є розробка аспектів методичного підґрунтя використання Положення про СУБР на підприємствах сфери залізничного транспорту. При цьому розглянуто такі завдання:

- запропонувати математичну модель оцінки навченості персоналу підприємства;
- визначити перспективи розвитку ІНСУБР.

Виклад основного матеріалу.

1. Розробка математичної моделі оцінки навченості персоналу підприємства з питань безпеки руху

Виникає питання: яким чином впливає рівень навчання та знань персоналу підприємства з питань безпеки руху на рівень безпеки руху на цьому підприємстві. З одного боку відповідь очевидна: чим вище рівень знань (ефективність навчання персоналу підприємства з питань безпеки руху для забезпечення підтримання компетентності персоналу), тим вище рівень убезпечення залізничного перевізного процесу (кількість транспортних подій на 1000 поданих/прибраних вагонів). Але так буває не завжди, і зростання рівня знань також має межі. Тому потрібна модель оцінки двох рівнів для підтримки прийняття управлінського рішення.

Умови та припущення цієї моделі:

(1) серед чинників безпеки руху (технічний, технологічний, людський, середовище) будемо розглядати тільки людський чинник, бо мова йде про вплив рівня знань на безпеку руху. А знання – це поки що якість персоналу;
(2) персонал розглядається як однорідне поняття, він не поділяється на керівників, службу безпеки руху та працівників, як то позначено у Положенні про СУБР;
(3) завдання моделі – це, перш за все, підтримка прийняття управлінського рішення щодо виконання функції навчання у СУБР підприємства;
(4) оцінка може визначатися як для двох періодів контролю навчання, так і більше;
(5) враховуючи статистичний характер контролю виконання СУБР в частині управління персоналом, буде використаний апарат математичної статистики

Введемо такі позначення:

x_i – середній бал завершального тестування після навчання в ІНСУБР в і-й період навчання або контролю навчання. Саме після тестування можна казати про рівень знань з питань безпеки руху між i-м та (i +1) періодами навчання;

Y_i – кількість показників порушень та виробничих інцидентів (помилки при обслуговування обладнання + скарги на неотримання службових процедур + фактично зафіксованих порушень інструкцій) в і-й період контролю;

$y_i = Y_i/N_i$ – середня кількість порушень та виробничих інцидентів в і-й період контролю;

N_i – кількість працівників, що контролювались в і-й період контролю.

Декілька слів про Y_i. Це фактично показник рівня безпеки руху, який зазвичай на залізничному транспорті вимірюється абсолютною або відносною кількістю транспортних подій відповідно класифікатору транспортних подій. Але враховуючи різну інтенсивність залізничних перевезень, різні класифікатори та різний характер транспортних подій на різних підприємствах, було прийнято рішення використовувати саме кількість зафіксованих порушень та виробничих інцидентів, які не привели, але могли привести до транспортних подій.

Результати контролю можна представити (табл. 1).

Таблиця 1 – Стартові данні моделі
Table 1 – Starting model data

i	1	2	…	I
x_i	x_1	x_2	…	x_I
y_i	y_1	y_2	…	y_I

Етапи моделі.

Використання регресійного аналізу.

Оцінювати стан процесу зручно лінією регресії динаміки процесу у часі. Саме лінійна регресія найбільш приваблива для оцінки тенденції розвитку процесу, бо надає очевидну картину тренду розвитку процесу.

Опишем лінійну регресію [14] середнього балу знань (x_i) та середній бал порушень та виробничих інцидентів (y_i) у часі, опустивши математичні розрахунки, враховуючи розповсюдженість цього розділу математичної статистики. Це відповідно формули (1) та (2).

Лінія регресії рівня знань (навченості) персоналу визначається формулою:

$$x = a_x + b_x * i\ , \qquad (1)$$

Лінія регресії стану безпеки руху:

$$y = a_y + b_y * i\ . \qquad (2)$$

1. Використання кореляційного аналізу.

Кореляційний зв’язок будемо визначати за допомогою *коефіцієнта кореляції* за формулою

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{I} x_i \cdot y_i - I \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{I \cdot s_x \cdot s_y}, \quad (3)$$

де $\bar{x}, \bar{y}, s_x, s_y$ – середнє арифметичні та стандартне відхилення відповідно [14].

Коефіцієнт кореляції може приймати значення у таких межах:

$$-1 < r < +1, \quad (4)$$

Якісну характеристику тісноти зв'язку коефіцієнта рангової кореляції, як і інших коефіцієнтів кореляції, можна оцінити за шкалою [106]. Значимість або міцність кореляційного зв'язку (4) між признаками *x* та *y* визначається за допомогою таблиці Чеддока (табл. 2).

Таблиця 2 – Оцінки міцності зв'язку (таблиця Чеддока)
Table 2 – Bond strength estimates (Chaddock table)

Значення коефіцієнту кореляції r (3)	Міцність зв'язку
0.1 – 0.3	слабка
0.31 – 0.5	помірна
0.51 – 0.7	помітна
0.71 – 0.9	висока
0.91 – 0.99	дуже висока

2. Підтримка прийняття рішення.
Введемо позначення, які будуть використані у (табл.3):
«↑» – означає тенденцію на збільшення;
«↓» – означає тенденцію на зменшення.

Таблиця 3 – Процедура прийняття управлінського рішення
Table 3 – Management decision-making procedure

Сце-нарій	Тенденція лінії регресії		Значення коефіцієнта кореляції *r* (3)	Обґрунтування та коментарі	Варіанти управлінського рішення (ППР)
	З *x* (1)	з *y* (2)			
1	↑	↑	*r > 0.5*	Рівень знань збільшується, одночасно збільшується кількість порушень та інцидентів. Ситуація досить суперечлива	Переглянути тести , добавити актуальні питання з причин нещодавніх порушень
2	↑	↓	*r < -0.5*	Рівень знань збільшується, а кількість порушень та інцидентів зменшується. Найбільш логічна й бажана для керівництва ситуація	Система навчання достатньо ефективна. Не треба нічого змінювати
3	↓	↑	*r < -0.5*	Рівень знань зменшується, а кількість порушень та інцидентів збільшується. Система навчання не відповідає актуальним вимогам.	Треба суттєво переглянути теми з навчання, запросивши для цього експерта. Слід проаналізувати статистику порушень за найближчі 3-5 періодів контролю
4	↓	↓	r > 0.7	Незважаючи на зменшення рівня знань, кількість порушень також зменшується. Це може свідчить про те, що рівень знань достатньо високий	Зробити позачергове тестування всього персоналу

2. Перспективи розвитку інформаційної навчально-сертифікаційної мережевої системи управління безпекою руху

Проведене дослідження та результати експериментального впровадження ІНСУБР свідчать про її значний потенціал як інструмента підвищення ефективності управління знаннями, дисципліною персоналу та превентивного впливу на транспортну безпеку. Успішна апробація на рівні підприємства створює підґрунтя для подальшого розвитку системи у трьох стратегічних площинах: технологічній, організаційній та інституційній. Коротко опишемо ці напрямки.

2.1. Масштабування системи на рівні галузі

Масштабування ІНСУБР є ключовим етапом її розвитку, спрямованим на перехід від пілотного використання до широкого впровадження в межах усієї галузі залізничного транспорту України. Успішна експлуатація системи на окремому підприємстві створила передумови для розгортання ІНСУБР на рівні держави як основного цифрового інструмента забезпечення, моніторингу та підвищення професійної компетентності персоналу.

Першочерговими кроками масштабування є інтеграція системи в роботу:

- операторів інфраструктури,
- операторів під'їзних колій,
- операторів рухомого складу,
- залізничних перевізників,
- приватних операторів технологічного транспорту,
- навчальних центрів,
- галузевих інститутів підвищення кваліфікації.

У цьому контексті масове впровадження ІНСУБР супроводжуватиметься такими заходами:

(1) Адаптацією навчального контенту під специфіку виробничих процесів кожного оператора. Це дозволить не лише зберегти уніфіковану методологію навчання, але й врахувати технологічні особливості конкретних підприємств (вантажні операції, маневрова робота, обслуговування інфраструктури тощо).

(2) Розширенням функціональних можливостей системи для підтримки ролей і рівнів доступу — від інженерно-технічного персоналу до адміністрації та служби безпеки руху. Такий підхід забезпечить багаторівневу взаємодію користувачів із системою та дозволить налаштовувати модулі відповідно до повноважень.

(3) Централізацією збору та обробки аналітичних даних про проходження навчання, результати тестування, повторюваність помилок і ризики. Це створить основу для формування єдиного аналітичного ядра, яке зможе генерувати узагальнені звіти про стан підготовки персоналу та виявлені зони ризику по всій галузі.

У перспективі на базі ІНСУБР може бути створено єдину національну цифрову платформу з навчання, атестації та моніторингу знань персоналу, що працює у сфері залізничного транспорту. Такий підхід забезпечить:

- стандартизацію навчальних програм та процедур перевірки знань на рівні держави;
- скорочення витрат на паперовий документообіг та ручне адміністрування процесів навчання;
- єдиний реєстр сертифікованих фахівців, доступний контролюючим і регуляторним органам;
- підвищення прозорості системи контролю знань та забезпечення безперервності навчального процесу.

Таким чином, масштабування ІНСУБР із підприємства на галузь створить умови для цифрової трансформації системи управління знаннями та безпекою руху в залізничній галузі України, сприяючи зниженню інцидентності, підвищенню дисципліни та управлінської ефективності на системному рівнях.

2.2. Інтеграція з державними системами обліку та контролю

Наступним стратегічним етапом розвитку ІНСУБР є її інтеграція з державними інформаційно-аналітичними платформами та реєстрами, що функціонують у сфері транспорту, освіти, безпеки та трудових відносин. Це ключова умова для створення єдиного цифрового простору управління знаннями, верифікації кваліфікації та контролю за дотриманням нормативно-правових вимог у галузі.

Зокрема, інтеграція ІНСУБР передбачає підключення до таких систем:

- Державної системи електронного документообігу, що дозволить автоматизовано обмінюватися інформацією щодо навчання, сертифікації, протоколів перевірок та розслідувань порушень між підприємствами, навчальними центрами та регуляторними органами;
- Інформаційних систем Мінрозвитку України, які формують політику у сфері залізничного транспорту та безпеки перевезень. Обмін даними з ІНСУБР дозволить оперативно отримувати зведену інформацію про підготовку персоналу, рівень атестації та відповідність кваліфікаційних вимог;
- Систем цифрового контролю Державної служби України з безпеки на транспорті (Укртрансбезпека), для синхронізації статусів працівників, допусків до виконання робіт, записів про порушення та дотримання Положення про СУБР;

Запровадження такої міжсистемної інтеграції дозволить:

- автоматизувати верифікацію сертифікатів та навчального статусу працівника;
- ускладнити фальсифікацію записів про проходження навчання чи атестації, оскільки система працюватиме на основі реєстраційних токенів і цифрового підпису;
- пришвидшити процедури атестації персоналу через автоматичне підтягування даних;
- забезпечити наскрізний контроль дотримання вимог Положення про СУБР, із можливістю моніторингу не лише по підприємствах, але й по окремих підрозділах, спеціальностях чи посадових категоріях.

Завдяки інтеграції з державними платформами ІНСУБР може стати не лише галузевим, але й міжгалузевим стандартом управління знаннями, здатним масштабуватись на інші сфери критичної інфраструктури, де безпека залежить від рівня кваліфікації персоналу

2.3. Розширення функціональних можливостей системи

Функціональний розвиток ІНСУБР є одним із ключових чинників її стійкості, адаптивності та довгострокової ефективності. ІНСУБР має потенціал трансформуватись із системи перевірки знань у багаторівневу цифрову платформу управління ризиками, поведінковою безпекою та розвитком людського капіталу. Функціональні оновлення включають низку інноваційних рішень, що поєднують сучасні освітні технології з інструментами цифрової аналітики:

(1) Впровадження інтерактивних VR/AR-модулів

Розробка та інтеграція модулів віртуальної (VR) та доповненої (AR) реальності дозволить змоделювати критичні ситуації та аварійні сценарії у віртуальному середовищі. Це дасть змогу працівникам:

- тренуватись без ризику для здоров’я та обладнання;
- відпрацьовувати алгоритми дій у нестандартних умовах;
- підвищити рівень емоційної готовності до кризових подій.

(2) Індивідуалізовані траєкторії навчання

На основі результатів попереднього тестування, історії помилок, аналітики інцидентів та профілю ризику кожного працівника буде сформовано персоналізований навчальний маршрут. Така адаптація дозволить:

- фокусуватись на слабких темах;
- уникати дублювання вже засвоєного матеріалу;
- підвищити ефективність витрачення навчального часу.

(3) Адаптивна система тестування

Запровадження інтелектуального тестування, в якому складність завдань динамічно змінюється залежно від відповідей працівника, забезпечить точнішу оцінку реального рівня знань і зменшить ймовірність формального проходження сертифікації.

(4) Побудова цифрових карт ризиків

Система зможе формувати інтерактивні карти ризиків у режимі реального часу на основі:

- результатів тестувань;
- порушень у виробничій діяльності;
- звітів внутрішнього аудиту.

Це дозволить керівництву підприємств бачити «гарячі точки» у сфері безпеки; оперативно реагувати на тренди порушень; використовувати візуальні аналітичні інструменти для стратегічного планування.

(5) Модулі прогнозної аналітики на базі штучного інтелекту (AI)

Розробка AI-модуля, що аналізуватиме велику кількість факторів — кадрові переміщення, графіки чергувань, частоту порушень, стан обладнання, тощо дозволить:

- прогнозувати зони майбутніх ризиків;
- формувати превентивні дії на основі прогнозних сценаріїв;
- посилити роль СУБР як не лише реагуючого, а й превентивного інструмента управління безпекою.

2.4. Інтернаціоналізація системи

У контексті поступової інтеграції України до європейського правового, інфраструктурного та освітнього простору, важливим напрямом розвитку інформаційної навчально-сертифікаційної мережевої системи управління безпекою руху (ІНСУБР) є її інтернаціоналізація та адаптація до умов міжнародного ринку транспортної безпеки**.** Високий рівень цифровізації залізничного сектору ЄС, спільні виклики у сфері мобільності кадрів та підвищена увага до стандартів безпеки створюють передумови для масштабування ІНСУБР за межі України.

Зокрема, ІНСУБР може бути адаптована для використання у таких країнах, як Польща, Литва, Румунія, Словаччина — держави, з якими Україна має як активні залізничні коридори, так і високий рівень міграції кваліфікованих спеціалістів. Потенціал такого розвитку включає:

(1) формування транснаціонального ринку цифрової сертифікації персоналу.

Завдяки мультиформатному інтерфейсу та гнучкій модульній архітектурі ІНСУБР може бути локалізована мовно та нормативно відповідно до вимог країн Європейського Союзу. Це дозволить пропонувати єдиний цифровий стандарт навчання та сертифікації для фахівців у міжнародних залізничних компаніях; гармонізувати критерії професійної придатності між Україною та сусідніми країнами; розширити ринок освітніх послуг за участі українських розробників, методистів та інженерів.

(2) забезпечення навчання українських фахівців, які працюють за кордоном.

З урахуванням міграції тисяч українських спеціалістів у сфері транспорту, особливо після 2022 року, важливим завданням є підтримання їхньої професійної компетентності, незалежно від країни перебування. ІНСУБР дозволяє: надавати дистанційний доступ до курсів, тестів і сертифікації; віддалено перевіряти знання працівників, що залучені до міжнародних перевезень; створювати персоналізовані навчальні програми на базі українських та європейських стандартів.

(3) взаємне визнання електронних сертифікатів.

Розробка уніфікованої моделі взаємного визнання цифрових сертифікатів між Україною та країнами ЄС дозволить: скоротити тривалість процедур допуску до роботи на транспорті; спростити працевлаштування та перекваліфікацію фахівців; підвищити довіру до української системи навчання серед європейських партнерів.

(4) формування єдиного транскордонного освітньо-контрольного середовища.

На тлі поглиблення інтеграції української залізничної системи з європейською, ІНСУБР має потенціал стати базовою платформою для транскордонного управління кваліфікацією та безпекою

персоналу. Це відповідає загальній концепції ЄС щодо взаємного визнання освітніх результатів і цифрових сервісів у сфері критичної інфраструктури.

2.5. Нормативно-правове закріплення ІНСУБР

Для забезпечення довгострокової стабільності, масштабованості та інтегрованості ІНСУБР у державну інфраструктуру критично важливим є нормативно-правове закріплення її статусу. На цьому етапі розвиток системи має перейти від рівня внутрішньої ініціативи або пілотного рішення підприємства до формального визнання її частиною галузевої та національної нормативної бази.

Першим кроком до цього є включення ІНСУБР до чинних нормативних документів, які регулюють систему управління безпекою руху (СУБР), порядок професійної підготовки та атестації персоналу, державний нагляд і контроль за дотриманням правил експлуатації транспортної інфраструктури. Це дозволить визначити ІНСУБР як рекомендовану (на першому етапі) або обов'язкову (на наступному етапі) платформу для навчання, сертифікації та моніторингу знань працівників, що виконують функції, пов'язані з безпекою руху.

Наступними кроками мають стати:

- розробка єдиної методики верифікації сертифікатів. Для цього необхідно затвердити на рівні Мінрозвитку або Укртрансбезпеки формат електронного сертифіката; правила його збереження, перевірки дійсності та автоматичного обміну між платформами; механізм внесення відміток про оновлення знань або втрату кваліфікації.
- формування державного реєстру сертифікованих працівників залізничного транспорту. Цей реєстр повинен містити верифіковану інформацію про проходження навчання; фіксувати терміни дії сертифікатів та необхідність їх оновлення; бути інтегрованим із кадровими системами підприємств, щоб автоматично підтверджувати допуски до відповідних видів робіт.
- адаптація внутрішніх нормативних актів підприємств до використання ІНСУБР. Підприємства галузі мають внести відповідні зміни до положень про підрозділи з безпеки руху; програм внутрішнього контролю та аудиту; інструкцій з навчання та перевірки знань.

Висновки.

Розроблена регресійно-кореляційна модель визначення взаємозалежності між рівнем навчання питанням убезпечення перевезень та рівнем безпеки з вини людського чинника надасть можливість практично оцінювати рівень навченості персоналу підприємства питанням безпеки руху, визначати окремі розділи навчання та визначати запас стійкості у питаннях безпеки руху залізничного транспорту.

Дослідження та визначення п’яти напрямків розвитку ІНСУБР надає можливість підприємствам, які її впровадили, планувати розширення використання ІНСУБР, визначає подальше удосконалення системи, підвищує привабливість застосування системи у підприємствах сфери залізничного транспорту.

Перелік посилань

1. Положення про систему управління безпекою руху на залізничному транспорті (2021) [укр.]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0351-21#Text
2. Samsonkin V., Myronenko V., Bulgakova Iu., Shcherbyna R., Yurchenko O., Pohorilyi O. (2022). Multimodal logistics solutions in the conditions of incidental situations and threats to transport safety / Колективна монографія «Logistics systems: technological aspects of efficience». - Харків: Центр комп’ютерних технологий, ст. 3–37. ISBN 978-617-7319-66-4 [англ.] https://doi.org/10.15587/978-617-7319-66-4.ch1
3. Petersen, D. (2003) Techniques of Safety Management: A Systems Approach. San Diego: Amer. Society of Safety Engineers, 2003. - 364 pp. [англ.]

4. Bulakh, M., Okorokov, A., & Baranovskyi, D. (2021). Risk System and Railway Safety. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 666(4), 042074. [англ.] https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042074
5. Read, G. J. M., Naweed, A., & Salmon, P. M. (2019). Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport. Reliability Engineering & System Safety, 188, 352–365. [англ.] https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.038
6. Em El-Koursi, Subhabrata Mitra, G. Bearfield (2018) Harmonising Safety Management Systems in the European Railway Sector Safety Science Monitor, I P S O Australia, Vol 11 (Issue 2), 14p. [англ.]
7. Kalem, A., Lindov, O., Šimić, E. (2021). Safety Culture in the Function of Optimization of Railway Safety Management System. In: Karabegović, I. (eds) New Technologies, Development and Application IV. NT 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 233. Springer, Cham. [англ.] https://doi.org/10.1007/978-3-030-75275-0_77
8. Samsonkin, V., Sotnyk, V., Yurchenko, O., Zmii, S., Myr onenko, V., Soloviova, O.(2022) Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 6/3(120), pp.32-43. [англ.] https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715
9. Panchenko, N. (2018). The formation of the system of risk-management on railway transport of Ukraine. Agrosvit, (22), 34. [англ.] https://doi.org/10.32702/2306-6792.2018.22.34
10. Michalak, M., Górka, W., Bagiński, J., Rogowski, D., Socha, M., Stęclik, T., Flisiuk, B., Leśniak, D., & Sikora, M. (2020). Central threat register – a complex system for risk analysis and decision support in railway transport. IET Intelligent Transport Systems, 14(8), 970–981. [англ.] https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0695
11. An, M., Qin, Y., Jia, L. M., & Chen, Y. (2016). Aggregation of group fuzzy risk information in the railway risk decision making process. Safety Science, 82, 18–28. [англ.] https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.08.011
12. Rahmayana, P. E., & Purba, H. H. (2019). Risk management in railway during operation and maintenance period: a literature review. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 04(04), 29–35. [англ.] https://doi.org/10.33564/ijeast.2019.v04i04.005
13. Safety management systems. ONRSR [англ.] https://www.onrsr.com.au/safety-essentials/safety-management-systems
14. Руденко В. М. (2012) Математична статистика. Навч. посіб. – К.: Центр учбової літератури, 2012. – 304 с. [укр.] https://shron1.chtyvo.org.ua/Rudenko_Volodymyr/Matematychna_statystyka.pdf.

ASPECTS OF IMPLEMENTATION OF AN INFORMATION TRAINING AND CERTIFICATION NETWORK SYSTEM FOR TRAFFIC SAFETY MANAGEMENT TO INCREASE THE LEVEL OF RAILWAY TRANSPORTATION SECURITY

Pohorilyi Oleksandr V., Postgraduate student of the National Transport University, e-mail: avpmailx@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4824-2191.

Summary. The article is dedicated to defining the features of the use and further development of the Information Training and Certification Network System for Traffic Safety Management to increase the level of railway transportation security (hereinafter – ITCNSTS). This information system was initiated by the author as a means of implementing the Regulation on the Safety Management System in Railway Transport in

Ukraine (enacted in 2021) for enterprises in the railway sector that previously did not have a dedicated train traffic safety service. Two aspects of the practical application and development of the Information Training and Certification Network System for Traffic Safety Management to enhance the level of railway transportation security are considered. The first aspect involves the development of a regression-correlation model to determine the interdependence between the level of training on transportation security issues and the level of safety due to the human factor. This will make it possible to assess the influence of the human factor on the level of traffic safety at the enterprise. The second aspect identifies five directions for the further development of the ITCNSTS: 1) System Scaling at the Industry Level – this will create conditions for the digital transformation of the knowledge and traffic safety management system in Ukraine's railway sector, contributing to a reduction in incidents, an increase in discipline, and management efficiency at the systemic level; 2) Integration with State Information and Analytical Platforms and Registers – operating in the areas of transport, education, security, and labor relations. This is a key condition for creating a unified digital space for knowledge management, qualification verification, and control over compliance with regulatory requirements in the industry. This will provide the possibility of integration with state platforms. The ITCNSTS can become not only an industry-specific but also an inter-industry standard for knowledge management, capable of scaling to other critical infrastructure sectors where safety depends on the personnel's qualification level; 3) Expansion of System Functionality – specifically, the implementation of interactive VR/AR modules, individualized learning paths, an adaptive testing system, the creation of digital risk maps, and predictive analytics; 4) System Internationalization – in the context of Ukraine's gradual integration into the European legal, infrastructural, and educational space, and adaptation to the conditions of the international transport security market; 5) Regulatory and Legal Entrenchment in the international and Ukrainian legal fields. To ensure the long-term stability, scalability, and integration of the ITCNSTS into the state infrastructure, regulatory and legal entrenchment of its status is critically important. At this stage, the system's development must transition from the level of an internal initiative or a pilot enterprise solution to formal recognition as a part of the industry and national regulatory framework. The first step towards this is the inclusion of the ITCNSTS in current regulatory documents governing the traffic safety management system, professional training and certification procedures for personnel, and state supervision and control over compliance with transport infrastructure operation rules. This will allow the ITCNSTS to be designated as a recommended (in the first stage) or mandatory (in the subsequent stage) platform for training, certification, and monitoring the knowledge of employees performing functions related to traffic safety.

Keywords: traffic safety, information system, management, transport technologies, analysis, statistical methods, development, training level, human factor, system internationalization.

References

1. Polozhennia pro systemu upravlinnia bezpekoiu rukhu na zaliznychnomu transporti (2021). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0351-21#Text
2. Samsonkin V., Myronenko V., Bulgakova Iu., Shcherbyna R., Yurchenko O., Pohorilyi O. (2022). Multimodal logistics solutions in the conditions of incidental situations and threats to transport safety / Колективна монографія «Logistics systems: technological aspects of efficience». - Харків: Центр комп'ютерних технологий, ст. 3–37. ISBN 978-617-7319-66-4, DOI: https://doi.org/10.15587/978-617-7319-66-4.ch1
3. Petersen, D. Techniques of Safety Management: A Systems Approach. San Diego: Amer. Society of Safety Engineers, 2003. - 364 pp.

4. Bulakh, M., Okorokov, A., & Baranovskyi, D. (2021). Risk System and Railway Safety. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 666(4), 042074. https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042074
5. Read, G. J. M., Naweed, A., & Salmon, P. M. (2019). Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport. Reliability Engineering & System Safety, 188, 352–365. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.038
6. Em El-Koursi, Subhabrata Mitra, G. Bearfield (2018) Harmonising Safety Management Systems in the European Railway Sector Safety Science Monitor, I P S O Australia, Vol 11 (Issue 2), 14p.
7. Kalem, A., Lindov, O., Šimić, E. (2021). Safety Culture in the Function of Optimization of Railway Safety Management System. In: Karabegović, I. (eds) New Technologies, Development and Application IV. NT 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 233. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75275-0_77
8. Samsonkin, V., Sotnyk, V., Yurchenko, O., Zmii, S., Myr onenko, V., Soloviova, O.(2022) Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 6/3(120), pp.32-43. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715
9. Panchenko, N. (2018). The formation of the system of risk-management on railway transport of Ukraine. Agrosvit, (22), 34. https://doi.org/10.32702/2306-6792.2018.22.34
10. Michalak, M., Górka, W., Bagiński, J., Rogowski, D., Socha, M., Stęclik, T., Flisiuk, B., Leśniak, D., & Sikora, M. (2020). Central threat register – a complex system for risk analysis and decision support in railway transport. IET Intelligent Transport Systems, 14(8), 970–981. https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0695
11. An, M., Qin, Y., Jia, L. M., & Chen, Y. (2016). Aggregation of group fuzzy risk information in the railway risk decision making process. Safety Science, 82, 18–28. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.08.011
12. Rahmayana, P. E., & Purba, H. H. (2019). Risk management in railway during operation and maintenance period: a literature review. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 04(04), 29–35. https://doi.org/10.33564/ijeast.2019.v04i04.005
13. Safety management systems. ONRSR. https://www.onrsr.com.au/safety-essentials/safety-management-systems
14. Rudenko V. M. (2012) Matematychna statystyka. Navch. posib. – K.: Tsentr uchbovoi literatury, 2012. – 304 s. https://shron1.chtyvo.org.ua/Rudenko_Volodymyr/Matematychna_statystyka.pdf