УДК 338:330.341 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-014-029**
UDC338:330.341

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДОЛОГІЇ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

FEATURES OF THE METHODOLOGY OF SCIENTIFIC RESEARCH ON PERSONNEL MANAGEMENT OF TRANSPORT ENTERPRISES IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION



Спіцина Ангеліна Євгенівна, *кандидат пед.наук, доцент, професор 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



Н***естеренко 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. Сучасна економічна методологія зазнає глибоких змін через науково-технічний прогрес і складність соціально-економічних систем. Економічна наука переживає кризу (військові дії, пандемія), та потребує нових підходів до досліджень. Методологія розглядається як багатовимірна структура, що поєднує філософські засади, науково-пізнавальні принципи, категоріальний апарат і методичний інструментарій. Зазначено, що в межах сучасної економічної науки методологія є інтегральною основою, яка формує дослідницьку позицію, впливає на побудову гіпотез, визначає межі валідності результатів та забезпечує відповідність між метою дослідження і засобами її досягнення. Економічна методологія повинна враховувати не тільки економічні, а й соціальні, культурні й етичні фактори, підкреслюючи важливість інтеграції різних дисциплін для глибшого розуміння процесів. Це дозволяє розглядати економічні явища в контексті ширших соціокультурних і моральних аспектів.

Розглянуто сучасні методи управління персоналом, що спрямовані на підвищення ефективності та стійкості підприємства транспортної галузі в умовах постійних змін та високої конкуренції. Акцентується увага на актуальність дослідження персоналу, обумовленого стрімким розвитком технологій та економічною нестабільністю. Проаналізовано такі методи, як компетентнісний підхід, розвиток та управління талантами, індивідуалізація навчання, адаптивне управління продуктивністю та створення ефективної корпоративної культури, впровадження цифрових технологій. Цифровізація є ключовим трендом у сучасному бізнес-середовищі, що зумовлює необхідність трансформації підходів до управління персоналу в підприємствах транспортної галузі. Впровадження цифрових рішень в управлінні персоналу стає запорукою підвищення

конкурентоспроможності підприємств. Наголошується, що ці методи не лише відповідають сучасним тенденціям, але й сприяють формуванню стійкої, адаптивної та конкурентоспроможної організації. Впровадження інноваційних підходів до управління персоналом є стратегічною необхідністю для підприємств, що прагнуть підвищувати свою конкурентоздатність і стабільність на динамічному ринку.

Ключові слова: методологія наукових досліджень, методологія економічної науки, методи науки, людина в науці, управління персоналом, підприємства транспорту. цифровізація; цифрові технології; цифрові інструменти.

Вступ. Постановка проблеми й актуальність обраної теми.

Стрімкий розвиток наукових процесів, модернізація науки як поняття у цілому, можливість прогнозувати та аналізувати події відкривають двері для здійснення наукових досліджень. Завдяки дослідженням розробляються нові методи пізнання, аналізу, а також удосконалюються ті, які вже маємо.

Розвиток наукових досліджень створює передумови для підготовки високо кваліфікованих фахівців, здатних до креативної роботи, конструктивного мислення, прогнозування подальшого розвитку науки тощо.

Отже, наукові дослідження мають велике значення у формуванні знань, умінь і навичок науково-дослідницької діяльності людини в сучасному світі[6].

За сучасних умов стрімко змінюються й оновлюються знання про явища і процеси навколишнього світу. У такій складній і мінливій ситуації вибір оптимальних управлінських рішень неможливий без дослідницьких навичок і творчого пошуку. Для того щоб самостійно ставити і творчо розв'язувати різні складні економічні проблеми, необхідно володіти не лише необхідним обсягом фундаментальних та спеціальних знань, інформаційними сучасними технологіями, адаптуватися до умов ринкової економіки, а й методами, методикою та методологією наукових досліджень, вміти використовувати в процесі їх здійснення сучасні технології, а також використовувати все нове і прогресивне, що з'являється в науці та практиці.

Останнім часом спостерігається значне проникнення цифрових технологій у всі аспекти життя суспільства. Це новий етап проривних інновацій, швидкого розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та зміни вимог як бізнесу, так і суспільства. З’являються нові форми економічної взаємодії та поширення знань, що є характерною рисою сучасної реальності, яка тісно пов’язана з процесами цифрової трансформації різних економічних систем. Глобальні виклики, такі як війна та пандемія COVID-19, ще більше підкреслили важливість цифрової трансформації та актуалізували необхідність досліджень у цій сфері[5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Сучасний стан наукового-технічного розвитку визначає нові проблеми та питання для дослідників. Найбільших змін зазнають методи, підходи та методологія наукових досліджень в економічній сфері. Причини таких змін та їх вплив на подальший науковий прогрес завжди потребували уваги науковців та залишаються актуальним об’єктом дослідження і сьогодні.

У вітчизняній та європейській академічній традиції значний внесок у розвиток методологічної проблематики здійснили Бабух І.Б. [1], Біліченко В.В. [3] В. Андрійчук, Л. Беновська, О. Іваненко, В. Голюк, І. Луценко [4], І. Добронравова, Н. Зарицька, П. Нікіфоров, Д. Чернілевський, Т. Писаренко, та інші, які досліджували методологію як багаторівневу систему: від філософсько-світоглядних основ до

конкретних дослідницьких процедур. Недостатньо розробленими є також механізми адаптації методологічних моделей до специфіки конкретних галузей знання, зокрема економіки, маркетингу.

Вивченням питань впливу цифрових технологій на ефективність управління персоналом займалися закордонні та вітчизняні вчені: Берсін Дж., Бей Г. В., Голобородько О. П., Длугопольська Т.І.,Гук Ю. [5], Колот А., Герасименко О. [10], Кравчук О., Варіс І. [11], Краус Н. М., Колобердянко І. І, Лопушняк Г. С., Хаврова К. С. [20], Продіус О. І. та інші. Але існує необхідність у дослідженні функціонування системи управління персоналом підприємств транспорту в умовах цифровізації.

Метою статті є теоретичне обґрунтування методології як моделі наукового дослідження, що структурно та концептуально організовує дослідницький процес в управлінні персоналом транспортного підприємства, забезпечує логічну цілісність наукового знання та сприяє підвищенню якості результатів у соціально-економічній сфері та напрями удосконалення в умовах трансформаційних перетворень та цифровізації управлінських процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження й отриманих результатів.

Методологія є фундаментальною основою наукового пізнання, що забезпечує структурований та логічний підхід до досліджень. У широкому розумінні методологія представляє собою форму практичного і теоретичного засвоєння дійсності, яка виходить із закономірностей руху досліджуваного об’єкта та систему принципів теоретичної і практичної діяльності, спосіб побудови думки. У загальносвітоглядному значенні методологія — це наука про організацію життя, у тому числі науково-дослідницької діяльності, й отже його теоретична модель. Вона гарантує валідність, надійність та відтворюваність отриманих результатів, роблячи їх цінними для наукової спільноти, а також забезпечує внутрішню логіку та цілісність. Це не просто набір методів, а глибока філософія процесу дослідження, що керує кожним етапом пізнання. Отже, методологія — це системний підхід до організації наукового дослідження. Вона визначає весь шлях від формулювання проблеми до отримання конкретних висновків[12].

Науково-технічний прогрес у транспортній галузі є одним із головних факторів розвитку суспільства, підвищення добробуту його громадян. Стратегічним завданням науково-технічної політики в галузі транспортної системи держави є вихід на світовий рівень за технічними параметрами та якістю послуг, що надаються транспортом. У зв'язку з цим пріоритетним завданням для транспортної галузі є розширення наукових досліджень з проблем створення передових технологій організації транспортно-технічних засобів нових поколінь, формування та функціонування ефективних транспортних засобів, інфраструктури, розробка принципово нових систем керування процесом перевезення вантажів та пасажирів з використанням передових інформаційних та цифрових технологій[7].

Науково-технічний прогрес у транспортній галузі значно змінює спосіб переміщення людей та вантажів, підвищує ефективність, безпеку та екологічність транспорту. Серед ключових напрямків розвиткує: електротранспорт, автономні транспортні засоби, використання альтернативних видів палива,удосконалення аеродинаміки, а також розвиток інтелектуальних транспортних систем [6].

До основних напрямів розвитку транспортної галузі належать:

- Електротранспорт (через зростання популярності електромобілів, електричнихавтобусів та вантажівок, що сприяє зниженню викидів шкідливих речовин та зменшенню залежності від викопного палива. З'являються нові технології акумуляторів, що забезпечують більший запас ходу та швидшу зарядку).

- Автономний транспорт (це і розробка та впровадження безпілотних автомобілів, вантажівок та дронів для перевезення вантажів. Автономний транспорт має потенціал підвищити безпеку на дорогах, зменшити затори та оптимізувати логістичні процеси).

- Удосконалення аеродинаміки (тобто розробка більш обтічних форм літаків, поїздів та автомобілів, що дозволяє знизити аеродинамічний опір та зменшити витрати палива).

- Альтернативні види палива (через активне дослідження та впровадження альтернативних видів палива, таких як водень, біопаливо та синтетичне паливо, для зниження викидів парникових газів).

- Інтелектуальні транспортні системи (розробка та впровадження ІТС, що включають системи управління дорожнім рухом, системи допомоги водієві, системи моніторингу та контролю за транспортом. ІТС дозволяють оптимізувати потік транспорту, підвищити безпеку та ефективність перевезень).

- Розвиток гіперлупів (це дослідження та розробка надшвидкісних транспортних систем на основі магнітної левітації, що дозволяють переміщувати пасажирів та вантажі зі значно більшою швидкістю, ніж традиційні види транспорту).

- Розвиток дронів (через широке використання дронів для доставки вантажів, моніторингу інфраструктури та інших завдань, що дозволяє значно скоротити час та витрати на перевезення).

- Розвиток водного транспорту (тобто впровадження нових технологій для суден, таких як електричні та гібридні двигуни, а також більш ефективні системи навігації та управління).

- Розвиток залізничного транспорту (за допомогою впровадження нових технологій для поїздів, таких як магнітна левітація, що дозволяє значно збільшити швидкість пересування).

Науково-технічний прогрес у транспортній галузі має значний вплив на економіку, екологію та соціальну сферу. Зменшення викидів, підвищення ефективності та безпеки, а також розвиток нових видів транспорту сприяють покращенню якості життя та сталого розвитку[18].

Наука – відповідно до Закону України «Про наукову та науково-технічну діяльність» – це сфера діяльності людини, спрямована на отримання (вироблення і систематизацію у вигляді теорій, гіпотез, законів природи або суспільства тощо) нових знань про навколишній світ. Основою науки є збирання, оновлення, систематизація, критичний аналіз фактів, синтез нових знань або узагальнень, що описують досліджувані природні або суспільні явища та (або) дозволяють будувати причинно-наслідкові зв’язки між явищами і прогнозувати їх перебіг. Як правило, такі процеси об’єднуються у наукову діяльність[14].

Наукова діяльність – це інтелектуальна творча діяльність, спрямована на здобуття й використання нових знань. Вона включає етапи отримання наукової продукції, а саме: виникнення або постановка проблеми; побудова гіпотез і застосування тих, які вже існують; створення та впровадження нових методів дослідження, спрямованих на доведення гіпотез; узагальнення результатів наукової діяльності[1].

Розуміння та правильне застосування методології наукових досліджень у транспортній галузі є критично важливим для розв'язання сучасних транспортних проблем та забезпечення сталого розвитку транспортної системи.

У Вікіпедії методологія трактується як вчення про «…метод діяльності як такий, включає принципи, методи діяльності і знання, що відображує їх» [7]. Фактично таке уявлення методології було аж до останнього часу. При цьому акцент в розумінні методології був зміщений на трактування сенсу методології як похідного, в основному, від від методу, або методики.

Згідно з «Великим тлумачним словником сучасної української мови» методика – це «документ, який описує послідовність методів, правил і засобів виконання роботи», а методологія – це «сукупність методів дослідження, що застосовуються в будь-якій науці відповідно до специфіки об'єкта її пізнання» [8].

Методологія (від грец. *methodos* – спосіб, метод і *logos* – наука, знання) –учення про правила мислення в процесі створення теорії науки. Питання методології досить складне, оскільки саме це поняття тлумачать по-різному.

Як відмічає І.С.Добронравова, методологія — це вчення про способи організації і побудови теоретичної і практичної діяльності людини. Вона досліджує цілісну систему способів і прийомів, методів пізнання і перетворення дійсності [12].

Багато зарубіжних наукових шкіл не розмежовують методологію і методи дослідження[16]. У вітчизняній науковій традиції методологію розглядають як учення про науковий метод пізнання або як систему наукових принципів, на яких ґрунтується дослідження і вибір сукупності пізнавальних способів, методів і прийомів. Найчастіше методологію розглядають: як теорію методів дослідження, створення концепцій; систему знань про теорію науки або про систему методів дослідження. Методику розуміють як сукупність прийомів дослідження, що включає техніку і різноманітні операції з фактичним матеріалом [16].

Сучасна цінність методології визначається тим, що вона виконує важливі соціальні функції – регулювання й оптимізація процесу людської діяльності й, зокрема, управлінської, визначення раціональних шляхів досягнення істинного знання про досліджуваний предмет та надання знанню логічної організації задля полегшення його використання в подальшій діяльності.

Функції сучасної методології наукового дослідження можна звести до таких:

–пояснююча - забезпечує адекватне, цілісне розуміння нового знання, демонструє його абсолютні і відносні грані;

–логіко-систематизуюча - уточнює, впорядковує й систематизує категоріальний (термінологічний) аспект науки;

–прогностична - розкриває горизонти розвитку науки, передбачає конкретні (досяжні на певному етапі) цілі пізнання;

– прагматична - визначає способи здобуття наукових знань, оптимальні шляхи руху до істини;

– креативна - сприяє вирішенню окремих проблем наукового дослідження, відкриттю нових знань.

Вказані функції роблять методологію невід'ємною частиною сучасної культури, або іншими словами, методологічна культура стає невід'ємною ознакою сучасного фахівця[16].

Ці ознаки методології, що визначають її функції в науці, дають змогу зробити такий висновок: методологія – це концептуальний виклад мети, змісту, методів дослідження, які забезпечують отримання максимально об'єктивної, точної, систематизованої інформації про певні процеси та явища[16].

Методологічна основа дослідження, як правило, не є самостійним розділом наукової праці, однак від її чіткого визначення істотною мірою залежить досягнення мети і виконання завдань наукового дослідження. Крім того, у розділах основної частини роботи подають виклад загальної методики й основних методів дослідження, а це потребує визначення методологічних основ певної роботи.

Під методологічною основою дослідження розуміється основне, вихідне положення, на якому ґрунтується наукове дослідження. Методологічні основи певної науки завжди існують поза цією наукою, за її межами і не виводяться із самого дослідження.

Методологія – вчення про систему наукових принципів, форм і способів дослідницької діяльності – має чотирирівневу структуру. Нині розрізняють фундаментальні, загальнонаукові принципи, що становлять власне методологію, конкретнонаукові принципи, які лежать в основі теорії тієї чи іншої дисципліни або наукової галузі, і систему конкретних методів і технік, що застосовуваних для виконання спеціальних дослідних завдань (рис.1)[13].

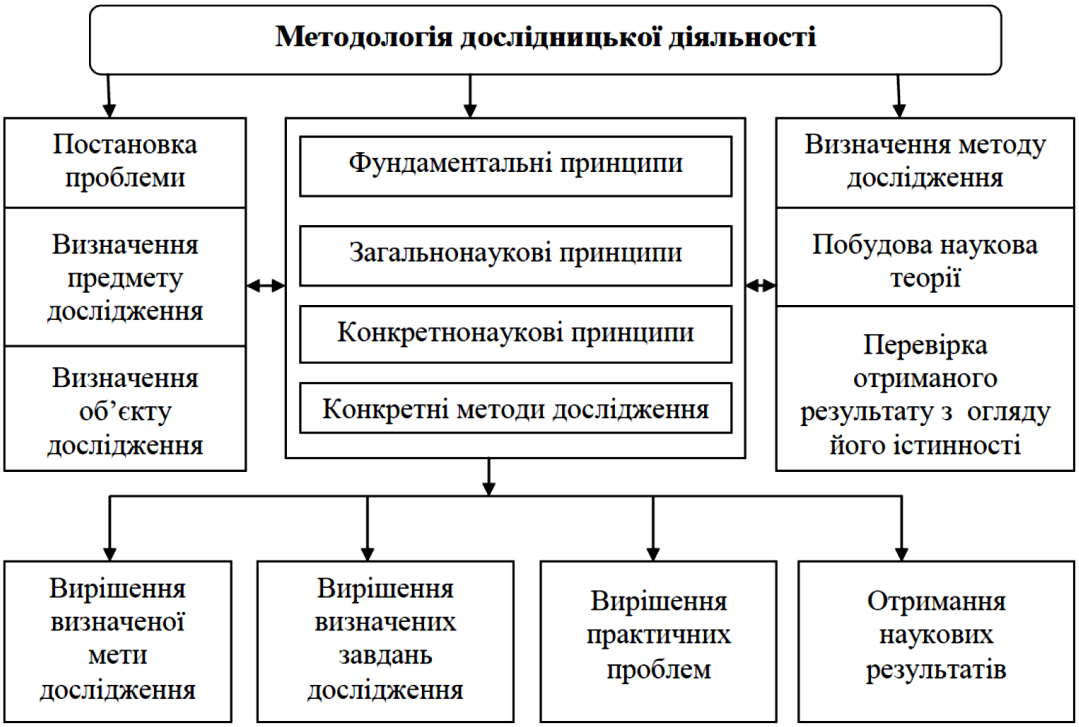


Рисунок 1 – Методологія дослідницької діяльності
Figure 1 – Research methodology
Джерело: побудовано автором за даними [12,13].
Source: constructed by the author based on data from [12,13]

Найважливішими аспектами застосування методології є: постановка проблеми, визначення предмету та об'єкту дослідження, визначення методу дослідження, побудова наукової теорії, а також перевірка отриманого результату з огляду його істинності, тобто відповідності об'єкту вивчення.

Необхідно також зазначити, що результати наукової і практичної діяльності людей залежать не лише від того, хто діє (суб'єкт пізнання) або на що спрямована пізнавальна діяльність (об'єкт пізнання), а й від того, якими способами, прийомами і засобами здійснюється пізнавальний процес.

Поглиблення взаємозв'язку наук призводить до того, що результати, моделі і методи одних наук все більш широко використовуються в інших. Одна з основних задач дослідника полягає у виявленні і вивченні методів пізнавальної діяльності, здійснюваної в конкретній науці, у визначенні можливостей і меж застосування кожного з цих методів[4].

Зміни в економічних, соціальних та технологічних аспектах діяльності транспортних підприємств вимагають впровадження інноваційних методів управління, що дозволяють ефективно використовувати людські ресурси як ключові ресурси для досягнення стратегічних цілей. Зокрема, цифровізація управлінських процесів, розвиток систем управління талантами, впровадження гнучких графіків та дистанційної роботи є не лише трендами, але й потребами для сучасного бізнесу, який прагне залучати та утримувати найкращі кадри.

Науковці визначають та використовують різні методи наукових досліджень, проте варто розглянути категорію загальних методів[1,3,6,7,13].

Загальні методи застосовують на етапі всієї тривалості дослідження, галузь знань та особливості дослідження ролі не відіграють (рис.2).

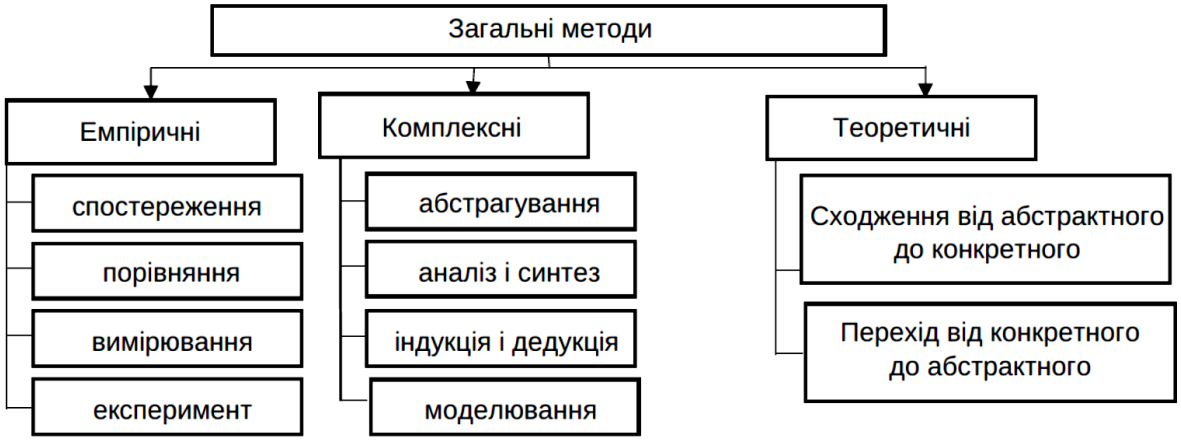


Рисунок 2 – Структура методів наукового дослідження
Figure 2 – Structure of scientific research methods
Джерело: побудовано автором за даними [12,16].
Source: constructed by the author based on data from [12,16]

Емпіричний метод може використовуватись зазвичай під час збору необхідної інформації, або даних. Загалом, методи збору вважають простими у виконанні та можуть бути застосовані в різних направленнях та сферах діяльності.

Комплексні методи використовуються як на емпіричному, так і на теоретичному рівнях дослідження, які допомагають чітко розділити на складові або, навпаки, об’єднати складові елементи дослідження та проаналізувати його.

Теоретичні методи дослідження використовують для відбору релевантної і актуальної інформації для узагальнення та формування кінцевого висновку про об’єкт.

Дослідження сучасних методів управління персоналом є важливим для визначення практичних інструментів, які сприятимуть досягненню високої ефективності, стабільності та стійкості транспортних підприємств в довгостроковій перспективі. Розробка та впровадження таких підходів є стратегічною необхідністю для сучасних підприємств, які прагнуть підвищувати конкурентоспроможність, забезпечувати внутрішню стабільність та адаптивність до зовнішніх викликів, зокрема на фоні економічних і соціальних змін у суспільстві[2].

Дослідження сучасних українських науковців охоплюють широкий спектр питань щодо управління персоналом – від впровадження компетентнісних моделей та цифрових технологій до розвитку корпоративної культури та стратегічного управління людськими ресурсами[2,6,11,18].

Управління персоналом транспорту - це сукупність заходів для планування, відбору, найму, адаптації, навчання, оцінки, мотивації та раціонального розміщення співробітників (водіїв, логістів, технічного персоналу) на транспортних підприємствах з метою досягнення стратегічних і тактичних цілей компанії. Цей процес включає розробку кадрової політики, створення ефективної системи управління, що впливає на діяльність та розвиток працівників, а також використання адміністративних, економічних та соціально-психологічних методів управління.

Ключовими аспектами управління персоналом транспортних підприємств є:

- Планування потреби в кадрах шляхом визначення кількості та кваліфікації працівників, необхідних для виконання транспортних завдань.
- Підбір та найм використовуючи відбір кандидатів на посади, які відповідають вимогам (наприклад, водіїв, механіків, диспетчерів), а також їхнє працевлаштування.
- Адаптація через введення нових співробітників в колектив, знайомство з корпоративною культурою та специфікою роботи.
- Навчання та розвиток, як ось - організація професійного навчання, підвищення кваліфікації та перекваліфікації, що особливо важливо для безпечного керування транспортом.
- Оцінка персоналу використовуючи систематичний моніторинг та оцінку результативності роботи, професійних якостей працівників.
- Мотивація та стимулювання, тобто розробка систем оплати праці, преміювання, соціальних пакетів для підвищення зацікавленості та лояльності співробітників.
- Розміщення та перерозподіл шляхом раціонального призначення працівників на посади, де вони можуть найкраще проявити свої здібності, та перерозподіл за потреби.

Необхідно зазначити, що в умовах посилення конкуренції на ринку транспортних послуг ефективність виробничо-економічної діяльності транспорту в значній мірі залежить від якості управління людськими ресурсами. Специфічні умови праці транспорту проявляються в усіх основних аспектах управління персоналом: виробничо-економічному, політичному, адміністративноправовому, соціальному та психологічному. Вони ускладнюють процес управління персоналом та роблять вирішення цих питань ще важчим[2,6,18]. Важливою специфічною особливістю транспорту є багаточисельність та територіальна розрізненість транспортних підприємств, а також відірваність екіпажу транспортних засобів, які виконують вантажні та пасажирські перевезення, від системи управління транспортним підприємством. Це сприяє виникненню додаткової персональної відповідальності виробничого складу робітників транспорту, ускладнює процеси взаємодії виробничого та управлінського персоналу, підвищує вимоги до достовірності, повноти та своєчасності інформації про виконання транспортного процесу.

Управління персоналом підприємства охоплює широкий спектр функцій від прийому до звільнення кадрів, передбачає інформаційне, технічне, нормативно-методичне, правове і документаційне забезпечення системи управління персоналом. Для побудови системи управління персоналом використовуються різні методи, які наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Методи побудови системи управління персоналом
Table 1 – Methods for building a personnel management system

Методи	Значення
Метод послідовної підстановки	Вивчення впливу на формування системи управління персоналом кожного чинника окремо, елімінуючи дію інших чинників
Метод порівнянь	Дозволяє порівняти існуючу систему управління персоналом з подібною системою передового підприємства, з нормативним станом або станом у минулому
Динамічний метод	Передбачає розташування даних в динамічному ряду і виключення з нього випадкових відхилень. Цей метод використовується при дослідженні кількісних показників, що характеризують систему управління персоналом
Метод структуризації цілей	Припускає кількісне і якісне обґрунтування цілей підприємства в цілому і цілей системи управління персоналом з точки зору їх відповідності цілям організації
Експертно- аналітичний метод	Ґрунтується на залученні висококваліфікованих фахівців підприємства
Нормативний метод	Передбачає застосування системи норм і нормативів, які визначають склад і зміст функцій по управлінню персоналом, чисельність працівників по функціях, тип організаційної структури, критерії побудови структури апарату управління підприємством в цілому і системи управління персоналом
Метод функціонально-вартісного аналізу	Дозволяє вибрати такий варіант побудови системи управління персоналом, який вимагає найменших витрат і є ефективним з точки зору кінцевих результатів
Балансовий метод	Дозволяє зробити балансові зіставлення, ув'язки
Метод аналогії	Полягає в застосуванні організаційних форм, які виправдали себе у функціонуючих системах управління персоналом

Джерело*: складено автором за даними [2, 5, 18].*
Source: compiled by the author based on data from [2, 5,18].

Для досліджень управління персоналом використовуються методи наукового абстрагування, системного підходу (дослідження сутності та змісту категорії «персонал»), класифікаційно-аналітичний (класифікація чинників впливу на розвиток персоналу підприємств), соціологічний (анкетування працівників підприємств); формально-логічний та метод узагальнення (при визначенні напрямів та тенденцій розвитку персоналу), аналізу і синтезу, індукції і дедукції (при визначенні класифікаційних ознак підприємств та при розробці моделі мотиваційного механізму ефективного використання персоналу), прогнозування (передбачення можливих варіантів розвитку економічних процесів з урахуванням дії різноманітних факторів), графічний (візуалізація тенденцій розвитку й ефективності використання персоналу), кореляційно-регресійний (кількісний аналіз взаємозв'язку продуктивності праці та факторів, які на неї впливають) [2].

Сучасні методи управління персоналом є вирішальним елементом у забезпеченні ефективності та стійкості підприємства, особливо в умовах динамічного ринку, де швидкі зміни і потреби у кваліфікованих кадрах стають ключовими факторами успіху. Упровадження новітніх методик

дозволяє підприємству не лише ефективно використовувати наявні людські ресурси, але й забезпечувати постійний розвиток та адаптивність до зовнішніх викликів. До основних сучасних методів управління персоналом відносяться:

- Компетентнісний підхід, що передбачає формування профілю компетенцій для кожної посади, що включає професійні знання, навички, особистісні якості та мотиваційні аспекти. Це дозволяє ефективно підбирати персонал, оцінювати відповідність його компетенцій вимогам та здійснювати індивідуальний розвиток. Перевагою є можливість швидкої адаптації працівників до нових умов та задач [2].

- Розвиток та управління талантами. Для цього важливими інструментами є програми наставництва, коучинг, кар'єрне планування та участь у ключових проектах. Управління талантами підвищує мотивацію працівників та забезпечує стабільне зростання організації через розвиток внутрішніх лідерів.

- Індивідуалізація навчання та розвитку персоналу. Сучасні підходи до навчання зосереджені на індивідуальних потребах працівників і використовують змішане навчання (blended learning), онлайн-курси, персоналізовані плани розвитку та навчання «on-the-job». Такі методи допомагають швидко адаптувати працівників до нових вимог та технологій, підвищуючи їх ефективність.

- Адаптивне управління продуктивністю. Цей метод передбачає регулярну оцінку результатів діяльності персоналу, включаючи короткі зустрічі зворотного зв’язку (feedback sessions), постановку чітких і досяжних цілей (SMART) і гнучке налаштування систем мотивації. Постійний зворотний зв'язок дозволяє вчасно коригувати роботу працівників, покращує комунікацію між керівниками та підлеглими, підвищує їхню залученість та задоволеність роботою.

- Створення ефективної корпоративної культури, яка є невід'ємною частиною стійкості організації, адже саме цінності, норми та поведінкові стандарти допомагають інтегрувати нових працівників та підтримувати мотивацію в команді. Створення культури взаємної підтримки, відкритого обміну знаннями та інноваційного підходу до роботи формує сильний кадровий потенціал та підвищує лояльність працівників до організації[18].

- Гнучкий графік роботи та розвиток дистанційних форм праці. Ці форми роботи дозволяють підприємствам забезпечити комфортні умови для працівників, особливо важливі для залучення молодих фахівців і зменшення плинності кадрів. Це стає важливим чинником утримання персоналу, сприяє підвищенню продуктивності та дозволяє залучити таланти з різних регіонів.

- Побудова системи стратегічного планування кадрів. Планування потенціалу на основі стратегічних цілей організації передбачає аналіз поточних і майбутніх потреб у кадрах, розвиток кар’єрних шляхів та можливостей внутрішнього просування. Воно забезпечує стабільний кадровий резерв та мінімізує ризики втрати кваліфікованих спеціалістів. Стратегічне планування кадрів дозволяє не лише зберігати ключових працівників, але й забезпечувати ефективну заміну та підготовку нових кадрів [2].

- Орієнтація на добробут працівників. Забезпечення фізичного, емоційного та соціального добробуту працівників має великий вплив на їхню продуктивність та лояльність до організації. Програми з підтримки здоров’я, гнучка політика щодо робочого часу, заходи з розвитку командного духу і корпоративного волонтерства сприяють забезпеченню емоційного та соціального добробуту працівників та стійкості організації.

- Підходи до залучення та утримання молодих фахівців, так як важливо забезпечувати привабливість для молодих спеціалістів шляхом реалізації прогресивних програм для стажистів, надання можливостей кар'єрного зростання та навчання. Залучення молодих кадрів дозволяє вносити нові ідеї, швидше адаптуватися до змін ринку та формувати кадровий потенціал на перспективу [10].

- Впровадження цифрових HR-технологій. Цифровізація HR-процесів охоплює використання автоматизованих платформ для рекрутингу, адаптації, управління продуктивністю, розробки кар'єрних

траєкторій та управління навчанням. Завдяки таким інструментам можна швидко збирати дані про працівників, аналізувати їхню ефективність та прогнозувати потреби в кадрах. Це забезпечує кращий контроль за кадрами та мінімізує людські помилки в управлінні [5].

Сучасні тенденції використання цифрових технологій в управлінні персоналом сприяють автоматизації, підвищенню ефективності та покращенню взаємодії між працівниками та підприємством; допомагають зробити управління персоналом ефективнішим, підтримуючи розвиток та збереження талантів у сучасному цифровому середовищі.

Застосування інноваційних цифрових технологій сприятиме підвищенню рівня ефективності управління персоналом за рахунок зростання продуктивності праці, підвищення кваліфікації та перекваліфікації працівників, створення творчого середовища для індивідуального розвитку кожного співробітника, здійснення акценту на креативних ідеях працівників, об'єднання особистої мети працівника з цілями підприємства.

В сучасних умовах найбільш ефективними та зручними є такі додатки та чат-бот-сервіси [15]:

– Wade and Wendy – чат-бот-сервіс, що здійснює консультації у сферах планування кар'єри, ознайомлює претендентів з умовами працевлаштування, показує кар'єрні можливості в підприємстві;

– Firstjob Mya – чат-бот, який може виконувати близько 75,0 % роботи спеціаліста з рекрутингу. Додаток створений на основі штучного інтелекту, ставить питання кандидатам, уточнює їх відповідність вимогам вакансії, відповідає на питання стосовно діяльності, політики й культури підприємства;

– Switch – популярна платформа, що допомагає кандидатам у пошуках роботи та найму;

– Unitive – програма, яку використовують для розробки та написання посадових обов'язків, дискусійних обговорень, пов'язаних із наймом на роботу. На основі розроблених алгоритмів програма може визначати девіантну поведінку претендентів, що сприяє скороченню чисельності неусвідомлених помилок при наймі;

– E-staff – автоматизована програма, з допомогою якої можна оперативно отримувати та опрацьовувати нову інформацію, консультувати працівників в режимі онлайн, здійснювати опитування, проводити конкурси тощо;

– Moxie та Telligent – програмне забезпечення, що використовується переважно в соціальних мережах із метою відстеження, оцінки та залучення наявних і потенційних клієнтів;

– Jive – соціальна платформа, що займається пошуком контенту, передбачає створення блогів, здійснює аналітичні операції, проводить моніторинг окремих людей, груп, проєктів;

– Hurma Systems – система, яка може здійснювати затвердження відпусток чи вихідних, оцінку тих чи інших досягнень працівників, відстежувати заявки від претендентів і публікувати інформацію про вакансії в соціальних мережах. Нові співробітники отримують вітального листа-програму з описом першого робочого дня;

– BetterWorks – додаток, який дозволяє давати завдання й отримувати на них відповідь у формі зворотного зв'язку від колег. Тобто можливе безпосереднє спілкування з керівниками підрозділів, провідними спеціалістами та директором;

– LMS – інтерактивні платформи навчання на основі використання штучного інтелекту та віртуальної реальності. Суттєвою перевагою є те, що можна в будь-який час займатися саморозвитком. І працівники, й викладачі є носіями знань. Вони можуть здійснювати обмін контентом і отримувати відгуки без залучення керівництва.

В цілому цифровізація управління персоналом дозволяє підвищити його ефективність, залучати та розвивати талановитих працівників, покращити комунікацію та колаборацію, а також

адаптуватися до швидкозмінних вимог ринку. Впровадження цифрових інструментів та технологій управління персоналом стає ключовим фактором успіху для підприємств у сучасному бізнес-середовищі[20].

Основними завданнями цифрової трансформації є ефективний рекрутинг, навчання та розвиток персоналу, залучення мотивованих працівників, які здатні до генерації інноваційних ідей та націлені на підвищення кількісних і якісних показників результативності праці. Застосування цифрових технологій передбачає використання соціальних мереж, комунікаційних роботів («чат-ботів»), хмарних технологій, додатків, що створені на основі штучного інтелекту. Впровадження цифрових технологій допоможе усунути наявні проблеми в управлінні персоналом і сприятиме зростанню конкурентоспроможності підприємств транспортної галузі.

Висновки. Дослідження сучасних методів управління персоналом вказує на критичну важливість адаптації підприємств транспортної галузі до динамічних змін у бізнес-середовищі, викликаних глобалізацією та технологічним прогресом. Персонал, як ключовий ресурс, визначає ефективність і стійкість підприємства, а його розвиток вимагає впровадження інноваційних підходів, таких як цифровізація HR-процесів, управління талантами та адаптивні методи оцінювання продуктивності. Успішне використання цих методів сприяє не лише підвищенню мотивації працівників, але й формуванню стабільної корпоративної культури, яка забезпечує тривалу конкурентоспроможність.

Сучасні підприємства використовуючи методи наукових досліджень, повинні орієнтуватися на створення умов, що сприяють професійному розвитку та добробуту працівників, оскільки це безпосередньо впливає на їх продуктивність та лояльність. Використання компетентнісного підходу, індивідуалізація навчання, а також впровадження гнучких робочих режимів виявляються необхідними елементами для успішного управління персоналом.

Цифровізація управління персоналу є необхідною умовою для розвитку бізнесу, оскільки дозволяє адаптуватися до швидких змін, забезпечити ефективне управління людськими ресурсами та створити конкурентну перевагу для підприємства. Основними способами цифровізації HR процесів є використання соціальних мереж, штучного інтелекту, комунікаційних ботів, HRM систем, хмарних технологій, Big Data, геймифікації та віртуальної реальності. Концепт HR цифровізації передбачає стратегічний підхід до впровадження цифрових технологій та інструментів для покращення ефективності, автоматизації та оптимізації управління персоналу.

Перелік посилань

1.Бабух І. Б., Галін А. О.(2025) Розвиток економічної методології в контексті соціально-економічних трансформацій XXI століття. *Економічний простір.* 2025. № 197. С. 10-14.

2.Балановська Т.І., Михайліченко М.В., Троян А.В.(2020). Сучасні технології управління персоналом: навчальний посібник. Київ : ФОП Ямчинський О.В., 2020. 466 с.

3.Біліченко, В. В.(2020). Організація наукових досліджень в галузі транспорту. Практикум для студентів спеціальностей 274 - Автомобільний транспорт та 275 - Транспортні технології (за видами) : практикум / В. В. Біліченко, О. П. Шиліна. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 44 с. ISBN 978-966-641-822-0

4.Голюк, В., Луценко, І. і Нагорна, І. (2022). Сучасні тенденції та специфіка науково-дослідної діяльності. *Економіка та суспільство*. 2022. (40). URL: http://dx.doi.org/10.32782/2524-0072/2022-40-32 (дата звернення: 01.06.2025).

5. Длугопольська, Т., & Гук, Ю. (2021). Цифрова трансформація у сфері HR: напрямки, проблеми та можливості. *Причорноморські економічні студії* - Black Sea Economic Studies, (62). Doi: https://doi.org/10.32843/bses.62-2.

6.Дмитрів, І. В. (2019).Автомобільний транспорт. Теорія і практика наукових досліджень: навч.посібн. / І.В. Дмитрів ; Національний університет „Львівська політехніка”. Львів :СПОЛОМ, 2019. 316 с. :

7.Жаворонкова Г. В., Мельник Л. Ю.(2018) Сучасна направленість методології наукового пошуку в дослідженні формування економіки знань в інформаційному суспільстві. *Економіка та держава*. 2018. № 2. С. 16-21.

8.Великий тлумачний словник сучасної української мови (з дод. і допов.) /Уклад. і голов. ред. В. Т. Бусел. К.; Ірпінь: ВТФ «Перун», 2005. 1728 с.

9. Кірілмаз, С. К. (2020). Цифрова трансформація в управлінні людськими ресурсами: Дослідження цифрових практик HRM підприємств. Pressacademia, 7(3), 188–200.
Doi: https://doi.org/10.17261/pressacademia.2020.1282

10. Колот А., Герасименко О. (2020). 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)

11. Кравчук О., Варіс І. та Рябоконь І. (2023). Управління цифровою HR трансформацією менеджменту персоналу через цифрову HR стратегію / О.В. Infrastruktura rynku - *Ринкова інфраструктура,* (71). Doi: https://doi.org/10.32782/infrastruct71-28.

12.Методологія та організація наукових досліджень : навч. посіб. / І. С. Добронравова, О. В. Руденко, Л. І. Сидоренко та ін. ; за ред. І. С. Добронравової (ч. 1), О. В. Руденко (ч. 2). Київ : ВПЦ «Київський університет», 2018. 607 с.

13. Методологія та організація наукових досліджень: курс лекцій. Для самостійної підготовки здобувачів, які навчаються на другому (магістерському) рівні у галузі знань 26 «Цивільна безпека» / Укладачі: Н. В. Рашкевич, Ю. А. Отрош. Харків : НУЦЗУ, 2021. 124 с.

14.Про наукову і науково-технічну діяльність : Закон України від 06 квітня 2022 р. № 848-VIII / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/848-19#Text (дата звернення: 20.04.2025).

15.Писаревська Г. І.(2021). Тенденції розвитку використання Digital технологій в управлінні персоналом / Г. І. Писаревська // *Науковий вісник Херсонського державного університету*. – 2021. – № 41. – С. 54-60.

16.Радіонова І., Румик І. (2024). Методологія наукових досліджень в економіці : традиційний та оновлений підходи. *Вчені записки Університету «КРОК»*, № 1 73). С. 11-19.

17. Рудакова С. Г., Данилевич Н. С., Щетиніна Л. В., Касьяненко Ю. А. (2020). Digital HR - Майбутнє кадрового адміністрування. *Бізнес Інформ,* 1(504), 265–270.
Doi: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-1-265-270

18.Спіцина А. Є. КОРПОРАТИВНА КУЛЬТУРА ЯК ІНСТРУМЕНТ УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ В ПІДВИЩЕННІ ЇХ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ *Економічний вісник Дніпровської політехніки*, 2025, №1(89). С.209-219. https://doi.org/10.33271/ebdut/89.209

19. Стромайер С. (2020). Цифрове управління людськими ресурсами: концептуальне роз’яснення. Німецький журнал управління людськими ресурсами: Zeitschrift für Personalforschung, 34(3), 345–365. Doi: https://doi.org/10.1177/2397002220921131

20.Хаврова К.С., Доброжан Д.О.(2023). Вплив цифровізації на процес управління персоналом. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*. 2023. № 4 (43). С. 92-96.

FEATURES OF THE METHODOLOGY OF SCIENTIFIC RESEARCH ON PERSONNEL MANAGEMENT OF TRANSPORT ENTERPRISES IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION

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

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 Modern economic methodology is undergoing profound changes due to scientific and technological progress and the complexity of socio-economic systems. Economic science is experiencing a crisis (military actions, pandemic), and requires new approaches to research. Methodology is considered as a multidimensional structure that combines philosophical foundations, scientific and cognitive principles, categorical apparatus and methodological tools. It is noted that within modern economic science, methodology is an integral basis that forms a research position, influences the construction of hypotheses, determines the limits of the validity of results and ensures compliance between the goal of research and the means of achieving it. Economic methodology should take into account not only economic, but also social, cultural and ethical factors, emphasizing the importance of integrating different disciplines for a deeper understanding of processes. This allows us to consider economic phenomena in the context of broader socio-cultural and moral aspects. Modern methods of personnel management aimed at increasing the efficiency and stability of transport enterprises in the conditions of constant change and high competition are considered. Attention is focused on the relevance of personnel research due to the rapid development of technologies and economic instability. Methods such as the competency approach, talent development and management, individualization of training, adaptive productivity management and the creation of an effective corporate culture, the introduction of digital technologies are analyzed. Digitalization is a key trend in the modern business environment, which necessitates the transformation of approaches to personnel management in transport enterprises. The introduction of digital solutions in personnel management is a guarantee of increasing the competitiveness of enterprises. It is emphasized that these methods not only correspond to modern trends, but also contribute to the formation of a sustainable, adaptive and competitive organization. The introduction of innovative approaches to personnel management is a strategic necessity for enterprises that seek to increase their competitiveness and stability in a dynamic market.

Keywords: methodology of scientific research, methodology of economic science, methods of science, man in science, personnel management, transport enterprises. digitalization; digital technologies; digital tools.

References

1.Babukh I. B., Halin A. O.(2025) Rozvytok ekonomichnoi metodolohii v konteksti sotsialno-ekonomichnykh transformatsii KhKhI stolittia. Ekonomichnyi prostir. 2025. № 197. S. 10-14.

2.Balanovska T.I., Mykhailichenko M.V., Troian A.V.(2020). Suchasni tekhnolohii upravlinnia personalom: navchalnyi posibnyk. Kyiv : FOP Yamchynskyi O.V., 2020. 466 s.

3.Bilichenko, V. V.(2020). Orhanizatsiia naukovykh doslidzhen v haluzi transportu. Praktykum dlia studentiv spetsialnostei 274 - Avtomobilnyi transport ta 275 - Transportni tekhnolohii (za vydamy) : praktykum / V. V. Bilichenko, O. P. Shylina. – Vinnytsia : VNTU, 2020. – 44 s. ISBN 978-966-641-822-0

4.Holiuk, V., Lutsenko, I. i Nahorna, I. (2022). Suchasni tendentsii ta spetsyfika naukovo-doslidnoi diialnosti. Ekonomika ta suspilstvo. 2022. (40). URL: http://dx.doi.org/10.32782/2524-0072/2022-40-32 (data zvernennia: 01.06.2025).

5. Dluhopolska, T., & Huk, Yu. (2021). Tsyfrova transformatsiia u sferi HR: napriamky, problemy ta mozhlyvosti. Prychornomorski ekonomichni studii - Black Sea Economic Studies, (62). Doi: https://doi.org/10.32843/bses.62-2.

6.Dmytriv, I. V. (2019).Avtomobilnyi transport. Teoriia i praktyka naukovykh doslidzhen: navch.posibn. / I.V.Dmytriv; Natsionalnyi universytet „Lvivska politekhnika".Lviv:SPOLOM, 2019. 316 s. :

7.Zhavoronkova H. V., Melnyk L. Yu.(2018) Suchasna napravlenist metodolohii naukovoho poshuku v doslidzhenni formuvannia ekonomiky znan v informatsiinomu suspilstvi. Ekonomika ta derzhava. 2018. № 2. S. 16-21.

8.Velykyi tlumachnyi slovnyk suchasnoi ukrainskoi movy (z dod. i dopov.) /Uklad. i holov. red. V. T. Busel. K.; Irpin: VTF «Perun», 2005. 1728 s.

9. Kirilmaz, S. K. (2020). Tsyfrova transformatsiia v upravlinni liudskymy resursamy: Doslidzhennia tsyfrovykh praktyk HRM pidpryiemstv. Pressacademia, 7(3), 188–200.

Doi: https://doi.org/10.17261/pressacademia.2020.1282

10. Kolot A., Herasymenko O. (2020). 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)

11. Kravchuk O., Varis I. ta Riabokon I. (2023). Upravlinnia tsyfrovoiu HR transformatsiieiu menedzhmentu personalu cherez tsyfrovu HR stratehiiu / O.V. Infrastruktura rynku - Rynkova infrastruktura, (71). Doi: https://doi.org/10.32782/infrastruct71-28.

12.Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzhen : navch. posib. / I. S. Dobronravova, O. V. Rudenko, L. I. Sydorenko ta in. ; za red. I. S. Dobronravovoi (ch. 1), O. V. Rudenko (ch. 2). Kyiv : VPTs «Kyivskyi universytet», 2018. 607 s.

13. Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzhen: kurs lektsii. Dlia samostiinoi pidhotovky zdobuvachiv, yaki navchaiutsia na druhomu (mahisterskomu) rivni u haluzi znan 26 «Tsyvilna bezpeka» / Ukladachi: N. V. Rashkevych, Yu. A. Otrosh. Kharkiv : NUTsZU, 2021. 124 s.

14.Pro naukovu i naukovo-tekhnichnu diialnist : Zakon Ukrainy vid 06 kvitnia 2022 r. № 848-VIII / Verkhovna Rada Ukrainy. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/848-19#Text (data zvernennia: 20.04.2025).

15.Pysarevska H. I.(2021). Tendentsii rozvytku vykorystannia Digital tekhnolohii v upravlinni personalom / H. I. Pysarevska // Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. – 2021. – № 41. – S. 54-60.

16.Radionova I., Rumyk I. (2024). Metodolohiia naukovykh doslidzhen v ekonomitsi : tradytsiinyi ta onovlenyi pidkhody. Vcheni zapysky Universytetu «KROK», № 1 73). S. 11-19.

17. Rudakova S. H., Danylevych N. S., Shchetynina L. V., Kasianenko Yu. A. (2020). Digital HR - Maibutnie kadrovoho administruvannia. Biznes Inform, 1(504), 265–270.

Doi: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-1-265-270

18.Spitsyna A. Ye. KORPORATYVNA KULTURA YaK INSTRUMENT UPRAVLINNIa PERSONALOM PIDPRYIeMSTV TRANSPORTNOI HALUZI V PIDVYShchENNI YiKh KONKURENTOSPROMOZhNOSTI Ekonomichnyi visnyk Dniprovskoi politekhniky, 2025, №1(89). S.209-219. https://doi.org/10.33271/ebdut/89.209

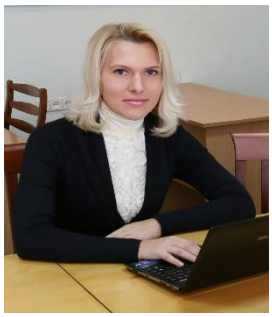
19. Stromaier S. (2020). Tsyfrove upravlinnia liudskymy resursamy: kontseptualne roziasnennia. Nimetskyi zhurnal upravlinnia liudskymy resursamy: Zeitschrift für Personalforschung, 34(3), 345–365. Doi: https://doi.org/10.1177/2397002220921131

20. Khavrova K.S., Dobrozhan D.O.(2023). Vplyv tsyfrovizatsii na protses upravlinnia personalom. Ekonomika. Menedzhment. Biznes. 2023. № 4 (43). S. 92-96

УДК 628.9(075.8)
UDC 628.9(075.8)
DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-030-036

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЮМОФОРНОГО ПОКРИТТЯ В СУЧАСНОМУ БУДІВНИЦТВІ

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF LUMOPHORIC COATINGS IN MODERN CONSTRUCTION



Бердник Оксана Юріївна *кандидат технічних наук, доцент кафедри Технології будівельних конструкцій і виробів Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, e-mail: kseniareznik87@gmail.com, тел. +38 0676276682,*
https://orcid.org/0000-0001-5321-3518



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



Скарлат Станіслав Олегович, *аспірант кафедри технології будівельних конструкцій і виробів, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, e-mail:stas24milioner@gmail.com, тел. +380633245029,*

http://orcid.org/0009-0005-2967-066X

Анотація. У роботі досліджено можливості інтеграції світлового елемента — люмінофора — у різні середовища. Проаналізовано приклади успішного застосування освітлювальних компонентів у дизайні різних об'єктів будівництва. У процесі дослідження враховано низку характеристик і унікальних властивостей люмінофора, які можуть бути ефективно використані в будівництві. Враховуючи сучасні обставини в країні, запропоновано нестандартні способи використання люмінофора як додаткового джерела освітлення або альтернативи традиційним світловим приладам. При цьому люмінофор не потребує електроенергії, адже здатен «накопичувати» енергію від сонячного світла. Відмінною рисою таких плівок, яка визначає їх фотофізичні властивості, є гетерофазний, дисперсний характер розподілу добавок люмінофорів у полімерній матриці, що дозволяє поглинати і перетворювати близько 1 % УФ-випромінювання сонця. Використання для зазначеної області проживання полімерних плівок з гомогенним розподілом люмінофорів у полімерній матриці в літературі практично не описано. Однією з вимог до одержання плівок є наявність люмінесцентних

властивостей і збереження їх в умовах експлуатації полімерних покриттів споруд захищеного ґрунту в сільському господарстві.

У зв'язку з цим необхідно провести дослідження флуоресцентних властивостей отриманих плівок і їх збереження в умовах фотохімічного розкладу люмінофорів, визначення інтенсивності люмінесценції залежно від вмісту люмінофорів і товщини отриманих плівок.

Ключові слова. Люмінофор, нетрадиційні світлові джерела, додаткове освітлення, світлові візуальні ефекти.

Вступ. На сьогоднішній день існує багато способів створення додаткового освітлення — зокрема, неонове підсвічування, люмінофорні та флуоресцентні фарби та покриття. Кожен із цих типів має власні унікальні властивості. Принципи дії люмінесцентних і фосфоресцентних матеріалів є подібними, однак фосфор становить небезпеку для здоров'я людини, тому його досить рідко застосовують у сучасному будівництві. Натомість матеріали, що містять люмінофор, є безпечними для людей і навколишнього середовища: вони не є радіоактивними, токсичними чи вибухонебезпечними.

Зазвичай люмінофорні покриття виготовляють із використанням безпечного акрилового лаку на водній основі або полімерів неорганічного походження. Через схожі властивості флуоресцентні та люмінесцентні фарби та покриття іноді плутають між собою. Проте між ними існує суттєва різниця: люмінесцентні матеріали світяться у темряві після впливу будь-якого джерела світла, тоді як флуоресцентні — лише під дією ультрафіолетового випромінювання.

Процес люмінесценції та його практичне застосування активно досліджують сучасні науковці, серед яких — Михайло Брік із Тартуського університету (Естонія) та Алок М. Шрівастава з GE Global Research (Нью-Йорк, США), автори книги *«Luminescent Materials»*. Також проблематику люмінофорів вивчають хіміки Зоїла Барандіаран і Луїс Сейхо з Мадридського автономного університету [1,2].

Інженери та конструктори, зокрема Анна Лаура Пізелло і Патрік Е. Фелан з Університету Арізони, а також дослідниця Пізелло з Університету Перуджі, зосереджують увагу на створенні люмінесцентних матеріалів, здатних зберігати й випромінювати світлову енергію протягом тривалого часу [3].

Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів. Люмінофор — це речовина, що здатна поглинати світло та випромінювати його в темряві. Такі хімічні сполуки нині широко застосовуються в наукових дослідженнях і технологічних розробках. Залежно від складу, люмінофори поділяють на неорганічні та органічні. Наприклад, неорганічні люмінофори використовують у люмінесцентних лампах, електронно-променевих трубках, рентгенівських дисплеях, індикаторах випромінювання та різних технічних пристроях. Натомість яскраві флуоресцентні фарби, що застосовуються у люмінесцентному аналізі, хімії, біології, медицині та криміналістиці, виготовляються на основі органічних люмінофорів [4].

Інтенсивність світіння люмінофора зростає зі збільшенням концентрації активного компонента. Люмінесцентні фарби є довговічними, оскільки процес поглинання та подальшого випромінювання світла може повторюватися багаторазово. Люмінофор має надзвичайно широкий спектр можливостей, тому його застосування охоплює безліч галузей. Його можна наносити практично на будь-яку поверхню — метал, пластик, гіпсокартон, бетон, дорожнє покриття, кераміку, скло, дерево тощо [5].

Люмінофорна фарба (покриття) та сам матеріал часто стають джерелом натхнення для створення естетичних декоративних виробів. Їх активно використовують у різних сферах — зокрема, у зовнішній рекламі, де люмінофор допомагає підкреслити написи або зображення, роблячи їх більш помітними. Крім того, люмінофорні пігменти застосовуються у виготовленні банкнот із захисними елементами, що світяться у видимому спектрі під дією ультрафіолетового випромінювання [6,7].

Згідно з висновками державної санітарно-епідеміологічної експертизи (СЕС) та сертифікатами безпеки виробників, люмінофор є безпечним для людини і доступним у вільному продажу. Завдяки своїм нешкідливим властивостям його використовують у виробництві постільної білизни, косметичних засобів, декоративного макіяжу (рис. 2), а також у творчих проєктах, пошитті сценічних костюмів, оформленні декорацій і створенні систем декоративного освітлення [8].

Крім зазначених властивостей, люмінофор має широкий спектр застосувань у різних сферах дизайну, зокрема в машинобудуванні. Тут його використовують як елемент тюнінгу автомобілів, а також як компонент у конструкції фар — завдяки люмінофору підвищується їхня яскравість і ефективність освітлення. Важливу роль цей матеріал відіграє й у світлотехніці: на його основі створюють люмінесцентні лампи, які знайшли застосування у багатьох галузях життя. Однією з головних переваг люмінофора є те, що його можна використовувати без складного обладнання чи спеціальних технологій.

Окрім того, люмінофор має унікальні напрями використання, зокрема у військовій сфері, де він цінується за здатність виявляти об'єкти навіть у повній темряві. Його застосовують у поєднанні з електронно-оптичними перетворювачами та приладами нічного бачення, які використовуються як у військових цілях, так і в наукових дослідженнях. Відповідно до наукових спостережень, усе навколишнє середовище, окрім видимого світла, також випромінює та відбиває інфрачервоне, тобто теплове, випромінювання [9].

Сьогодні люмінофор активно розглядається як ефективний компонент для застосування при будівництві дорожнього покриття. Завдяки своїй здатності зберігати та продовжувати світіння протягом тривалого часу у поєднанні з різними джерелами випромінювання, цей матеріал відкриває широкі можливості для уникнення ДТП і зручності для водіїв автотранспорту.

В умовах сучасних викликів у нашій країні такі властивості відкривають можливість для нетрадиційного використання люмінофора — як альтернативного або допоміжного джерела освітлення. Покриваючи ним різні поверхні, можна створювати нові, екологічні й енергоефективні способи освітлення [10, 11].

Люмінофор можна ефективно використовувати як альтернативне джерело освітлення. Для підтвердження цієї можливості було проведено серію якісних експериментів, спрямованих на дослідження впливу зовнішнього випромінювання на властивості матеріалу. У ході досліджень вивчали світлові ефекти люмінофора залежно від довжини хвилі та характеристик освітлення.

Результати експериментів показали, що під впливом дифузного джерела світла люмінофору потрібно близько однієї хвилини для поглинання енергії, після чого він починає яскраво світитися у темряві. Водночас було встановлено, що під дією тепла люмінофор втрачає свою здатність до світіння приблизно через 7 хвилин 30 секунд, однак не втрачає своїх властивостей і може бути повторно «заряджений» [12].

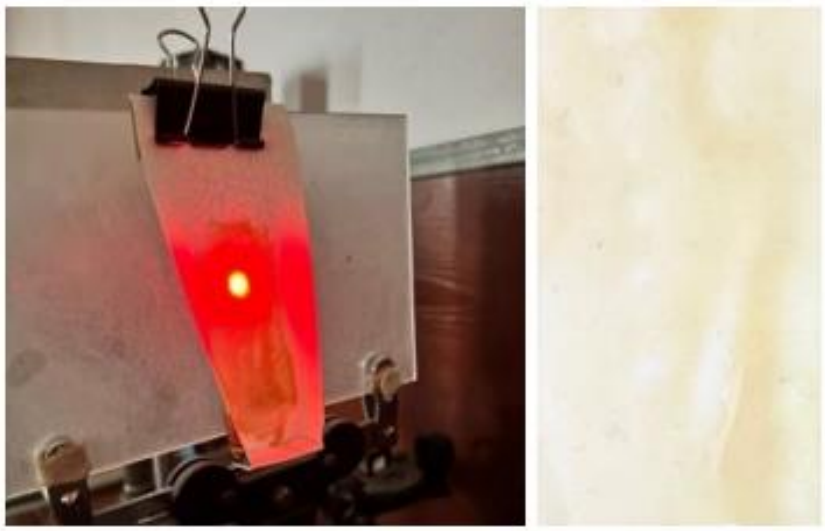


Рисунок 1 – Люмінофорне покриттям під впливом червоного точкового лазера
Figure 1 – Phosphor coating under the influence of a red dot laser

На наступному етапі дослідження використовували різні джерела випромінювання, зокрема три типи лазерів, для вивчення їхнього впливу на люмінофор.

Під час першого експерименту, коли застосовувався лазер із точковим червоним випромінюванням протягом двох хвилин, було встановлено, що такий тип лазера не забезпечує достатньої енергії для активації світіння люмінофора (рис. 1).

Подальше дослідження із застосуванням ультрафіолетового лазера показало, що вузький промінь створює на люмінофорному покритті чіткі контури малюнка (рис. 4), які залишаються видимими як при слабкому освітленні, так і в повній темряві. Проте з часом виявлено, що світловий малюнок поступово втрачає інтенсивність і зникає приблизно через 13 хвилин.

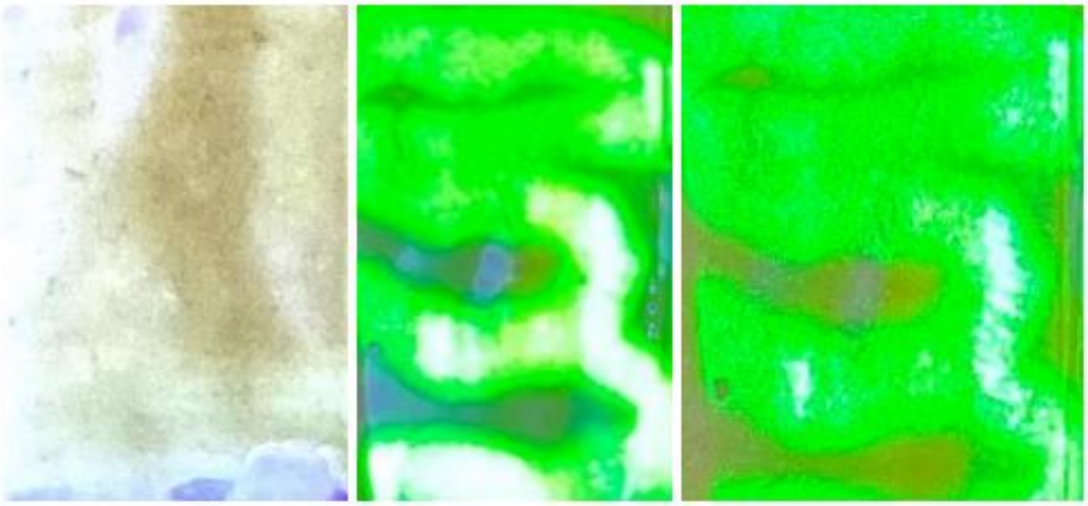


Рисунок 2 – Люмінофорне покриттям під впливом ультрафіолетового точкового лазера
Figure 2 – Phosphor coating under the influence of an ultraviolet point laser

У третьому експерименті було протестовано дію зеленого лазерного випромінювання. Результати показали, що цей тип лазера не впливає на люмінофор, тому він не може використовуватися як ефективне джерело його активації (рис. 2).

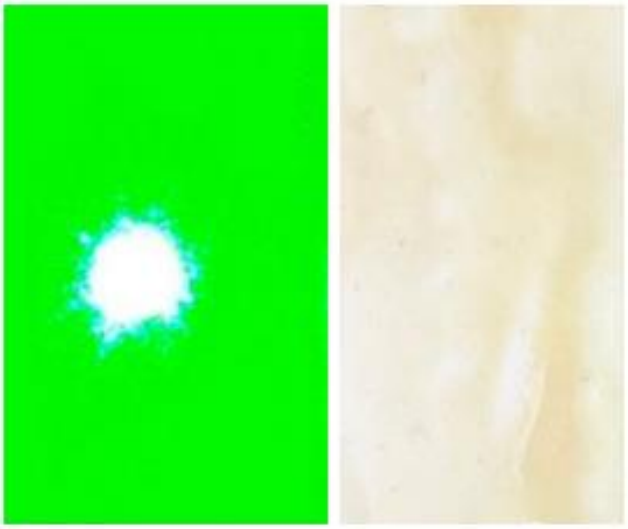


Рисунок 3 – Люмінофорне покриттям під впливом зеленого точкового лазера
Figure 3 – Phosphor coating under the influence of a green spot laser

У результаті дослідження трьох типів лазерного випромінювання — червоного, ультрафіолетового та зеленого — було встановлено, що інтенсивність лазера не є визначальним чинником у формуванні ефекту світлового малюнка. Аналіз показав, що саме ультрафіолетове випромінювання забезпечує найвищу яскравість люмінофора. Це підтверджує, що люмінофор світиться інтенсивніше під впливом УФ-променів, хоча здатен випромінювати світло і при звичайному природному чи штучному освітленні. Водночас зелені та червоні лазери виявилися малоефективними щодо активації світіння люмінофора.

Згідно з отриманими результатами, люмінофор може поглинати світло як при денному освітленні, так і під дією ультрафіолету. Було визначено, що вирішальним фактором для інтенсивності люмінесценції є довжина хвилі випромінювання, а не його потужність. Інакше кажучи, яскравість світіння більше залежить від спектрального складу світла, зокрема ультрафіолетового діапазону, ніж від інтенсивності самого випромінювання.

Експерименти також підтвердили, що люмінофор реагує на різні типи випромінювання та може використовуватися багаторазово, не потребуючи теплового впливу. Водночас важливим параметром для його практичного застосування є тривалість післясвітіння — під час дослідження встановлено, що невелике зображення без нагрівального елемента зникає приблизно через 10 хвилин.

Випробування за різних температур показали, що теплова дія незначно впливає на властивості люмінофора, тому додаткове нагрівання не призводить до суттєвих змін. Найкраще світіння спостерігається в умовах повної темряви, без додаткових джерел світла чи тепла.

Отже, люмінофор є унікальною речовиною, що має великий потенціал для застосування у завдяки своїм особливим характеристикам. Зокрема, його можна використовувати для зменшення впливу ефекту «міських теплових островів» — явища, коли сонячне тепло, поглинаючись дахами та дорожнім покриттям, підвищує температуру в міських районах у середньому на 7,7 °C порівняно з сільською місцевістю. Це не лише створює ризики для здоров’я, але й збільшує споживання енергії на охолодження будівель.

Згідно з експериментальними даними, світловідбивні матеріали, як от біла фарба чи світлий асфальтобетон, уже активно використовуються для зниження перегріву в міському середовищі. Проте додавання люмінофорних компонентів може зробити такі рішення ще ефективнішими, поєднуючи енергоощадливість із декоративним і функціональним ефектом.

Висновки. У роботі досліджено різні способи організації додаткового освітлення простору та визначено їхні характерні особливості. Розглянуто потенціал люмінофора як елемента в будівництві і окреслено основні напрями його використання. Запропоновано подальший розвиток нетрадиційних методів застосування люмінофора — як додаткового джерела освітлення або альтернативи традиційним світловим приладам в дорожньому будівництві. За результатами експериментальних досліджень із використанням люмінофорного елемента встановлено, що завдяки своїм унікальним властивостям люмінофор має значний потенціал для впровадження в інноваційні рішення у сфері світлового дизайну для будівництва. У ході якісних експериментів було з’ясовано, що люмінофорні матеріали здатні накопичувати світло від ультрафіолетового лазера протягом 2–3 секунд і зберігати його випромінювання приблизно 13 хвилин. При цьому було доведено, що зелений і червоний лазери майже не впливають на активність світіння люмінофора.

Під час досліджень також встановлено, що інтенсивність світіння матеріалу більше залежить від довжини хвилі ультрафіолетового випромінювання, ніж від потужності або типу лазера. Окрім того, спостереження показали, що невеликий люмінофорний малюнок без впливу теплового елемента поступово зникає приблизно через 10 хвилин.

Перелік посилань

1. Що таке люмінофор? | Epoxy Lviv. (2021). Retrieved from: https://epoxy-lviv.com.ua/ua/a468496-chto-takoe-lyuminofor.html

2. Наукова робота. Таємниця світіння | Колосок. (2019). Retrieved from: https://e-kolosok.org/naukova-robota-taiemnytsia-svitinnia/.
3. Дзікевич, А., Олейнікова, І., & Заїка, Н. (2021). Створення світлодизайну для шоу-майданчиків. «Актуальні проблеми сучасного дизайну» : матеріали Міжнародної науково-практ. конф., м. Київ, С. 161–163.
4. Чайка, П. (2020). Професії холодного світла — люмінесценція в науці й техніці | Науково-популярний журнал Познавайка. Retrieved from: https://www.poznavayka.org/uk/nauka-i-tehnika-2/profesiyi-holodnogo-svitla-lyuminestsentsiya -v-nautsi-i-tehnitsi/.
5. 1. Dovas. Starpath: Electricity-Free Alternative to Streetlights That Look Like A Starry Night. Bored Panda. URL: https://www.boredpanda.com/uv-park-paths-starpath-pro-teq/?utm_source=yandex&utm_medium=organic &utm_campaign=organic.
6. Biggs, J. Poland builds a solar-powered bike path that glows a ghostly blue. URL: https://techcrunch.com/ 2016/10/07/poland-builds-a-solar-powered-bike-path-that-glows-a-ghostly-blue/.
7. Luminescence Facts, Types & Examples | What is Luminescence? Study. URL: https://study.com/academy/ lesson/luminescence-facts-types-examples.html.
8. How do Phosphors Work – Phosphor Technology Ltd. Phosphor Technology Ltd. URL: https://www.phosphortechnology.com/how-do-phosphors-work/(дата звернення: 05.11.2022).
9. Kumar, A., Pratap, B. (2018). Luminescent Materials in Lighting, Display, Solar Cell, Sensing, and Biomedical Applications. Ed. S. Pyshkin. Taylor & Francis Group. 142 p. URL: https://doi.org/10.5772/intechopen.82123.
10. Mattiello, S. et al. (2021). First demonstration of the use of open-shell derivatives as organic luminophores for transparent luminescent solar concentrators. Materials Advances, Vol. 2, № 22, P. 7369–7378. URL: https://doi.org/10.1039/d1ma00659b.
11. Kleiner, K. (2021). Will Glow-in-the-Dark Materials Someday Light Our Cities? Knowable Magazine. URL: https://www.smithsonianmag.com/science-nature/will-glow-in-the-dark-materials-someday-light-our-cities180979075/.
12. Sharma, R., Bairagi, N. (2018). The Role of Photoluminescent Pigments in Textiles. Trends in Textile Engineering & Fashion Technology, Vol. 2, № 2. URL: https://doi.org/10.31031/tteft.2018.02.000533.

RESEARCH ON THE CHARACTERISTICS OF LUMINESCENT COATINGS IN MODERN CONSTRUCTION

Berdnyk Oksana Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Building Structures and Products Technology, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: kseniareznik87@gmail.com, +38 0676276682, https://orcid.org//0000-0001-5321-3518;

Chyzhenko Nataliia P., 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;*

Scarlat Stas O., postgraduate student of the department of Building Structures and Products Technology, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, *e-mail:stas24milioner@gmail.com, тел. +380633245029,* https://orcid.org/0009-0005-2967-066X.

Abstract. The paper explores the possibilities of integrating a light element – phosphor - into various environments. *Examples* of the successful use of lighting components in the design of various construction objects are analyzed. The study takes into account a number of characteristics and unique properties of phosphors that can be effectively used in construction. Given the current circumstances in the country, non-standard ways of using phosphors as an additional source of lighting or an alternative to traditional lighting devices are proposed. At the same time, phosphors do not require electricity, as they are capable of

"accumulating" energy from sunlight. A distinctive feature of such films, which determines their photophysical properties, is the heterophasic, dispersed

nature of the distribution of phosphor additives in the polymer matrix, which allows them to absorb and convert about 1% of the sun's UV radiation. The use of polymer films with homogeneous distribution of phosphors in the polymer matrix for this application is practically not described in the literature. One of the requirements for the resulting films is the presence of luminescent properties and their preservation under the operating conditions of polymer coatings of protected soil structures protected soil structures in agriculture. In this regard, it is necessary to conduct research on the fluorescent properties of the obtained films and their preservation under conditions of photochemical decomposition of phosphors, determination of the intensity of luminescence depending on the content of phosphors and the thickness of the obtained films.

Keywords: phosphor, non-traditional light sources, additional lighting, light visual effects.

Reference

1. What is a phosphor? | Epoxy Lviv. (2021). Retrieved from: https://epoxy-lviv.com.ua/ua/a468496-chto-takoe-lyuminofor.html

2. Scientific work. The secret of luminescence | Kolosok. (2019). Retrieved from: https://e-kolosok.org/naukova-robota-taiemnytsia-svitinnia/.

3. Dzikevich, A., Oleynikova, I., & Zaika, N. (2021). Creating lighting design for show venues. "Current issues in contemporary design": materials from the International Scientific and Practical Conference, Kyiv, C. 161–163.

4. Chaika, P. (2020). Cold light professions — luminescence in science and technology | Popular science magazine Poznayka. Retrieved from: https://www.poznavayka.org/uk/nauka-i-tehnika-2/profesiyi-holodnogo-svitla-lyuminestsentsiya -v-nautsi-i-tehnitsi/.

5. 1. Dovas. Starpath: Electricity-Free Alternative to Streetlights That Look Like A Starry Night. Bored Panda. URL: https://www.boredpanda.com/uv-park-paths-starpath-pro-teq/?utm_source=yandex&utm_medium=organic &utm_campaign=organic.

6. Biggs, J. Poland builds a solar-powered bike path that glows a ghostly blue. URL: https://techcrunch.com/ 2016/10/07/poland-builds-a-solar-powered-bike-path-that-glows-a-ghostly-blue/.

7. Luminescence Facts, Types & Examples | What is Luminescence? Study. URL: https://study.com/academy/lesson/luminescence-facts-types-examples.html.

8. How do Phosphors Work – Phosphor Technology Ltd. Phosphor Technology Ltd. URL: https://www.phosphortechnology.com/how-do-phosphors-work/(дата звернення: 05.11.2022).

9. Kumar, A., Pratap, B. (2018). Luminescent Materials in Lighting, Display, Solar Cell, Sensing, and Biomedical Applications. Ed. S. Pyshkin. Taylor & Francis Group. 142 p. URL: https://doi.org/10.5772/intechopen.82123.

10. Mattiello, S. et al. (2021). First demonstration of the use of open-shell derivatives as organic luminophores for transparent luminescent solar concentrators. Materials Advances, Vol. 2, № 22, P. 7369–7378. URL: https://doi.org/10.1039/d1ma00659b.

11. Kleiner, K. (2021). Will Glow-in-the-Dark Materials Someday Light Our Cities? Knowable Magazine. URL: https://www.smithsonianmag.com/science-nature/will-glow-in-the-dark-materials-someday-light-our-cities180979075/.

Sharma, R., Bairagi, N. (2018). The Role of Photoluminescent Pigments in Textiles. Trends in Textile Engineering & Fashion Technology, Vol. 2, № 2. URL: https://doi.org/10.31031/tteft.2018.02.000533

УДК 665.775:625.85 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-037-046**
UDC 665.775:625.85

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ У РАЗІ НЕМОЖЛИВОСТІ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ

MODERN APPROACHES TO ENSURING PAVEMENT DURABILITY IN THE ABSENCE OF MAJOR REPAIRS



Довбань Микола Валерійович, *аспірант кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет*
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010
e-mail: dovban.lru@gmail.com

https://orcid.org/0009-0005-8724-1994

Анотація. Виконано аналіз сучасних підходів до підвищення довговічності автомобільних доріг в умовах відсутності можливості виконання капітального ремонту. Розглянуто традиційні та альтернативні методи ямкового і поточного ремонту, зокрема тонкошарові покриття, полімерні добавки, а також наведено приклади міжнародного досвіду з продовження терміну служби дорожніх покриттів. Як практичний кейс представлено експлуатаційне утримання траси М-13 із застосуванням полімерної добавки прямого (сухого) введення до асфальтобетону; описано технологію виконання локального ремонту, наведено отримані результати щодо покращення стану покриття та економічного ефекту. Зроблено висновки про ефективність, технологічні переваги та перспективи масштабування таких підходів для забезпечення довговічності доріг без капітального ремонту.

Ключові слова: довговічність, дорожнє покриття, ямковий ремонт, тонкошарове покриття, полімерна добавка, превентивне обслуговування.

Вступ. Стан дорожнього покриття безпосередньо впливає на безпеку руху, швидкість транспортного потоку, витрати палива та рівень шкідливих викидів у атмосферу. Нерівності, тріщини та вибоїни на дорозі викликають підвищені шум і вібрації, призводять до зайвої втоми водіїв, прискореного зносу транспортних засобів. З часом, в результаті перевантаження покриття, старіння матеріалів та дії кліматичних факторів, на будь-якому дорожньому одязі виникають різноманітні дефекти і руйнування (нерівності, тріщини, відколювання, ями тощо).

Найбільш ефективним підходом до уповільнення деградації покриття є вчасне здійснення превентивного ремонту, зокрема захисна герметизація поверхні шляхом влаштування тонких шарів**.** Такий захисний шар з мінімальними витратами відновлює експлуатаційні властивості дорожнього полотна та перешкоджає проникненню вологи, покращуючи зчеплення колеса з дорогою і запобігаючи виникненню пластичних деформацій від інтенсивного руху. Асфальтобетонні і цементобетонні покриття потребують періодичного ремонту із влаштуванням нового верхнього шару зносу; без такого шару бетонне покриття швидко руйнується під дією води, що просочується у поверхню, замерзає і спричиняє відколювання бетону. На багатьох дорогах із старим зношеним покриттям можливе продовження строку служби шляхом його оновлення тонким ремонтним шаром, який закріплює верхню частину покриття, що інтенсивно руйнується, і дозволяє знову відкрити рух транспорту. Проведення такого відновлення бажано виконувати вже через декілька років після початку експлуатації покриття, не чекаючи повного втрати несучої здатності та капітального ремонту – це

здатне істотно збільшити довговічність асфальту та цементобетонну, а в окремих випадках навіть уникнути потреби в капітальному ремонті.

На практиці стратегія утримання доріг, що ґрунтується лише на капітальних ремонтах з інтервалом у 15–20 років, є неефективною з економічної точки зору. За оцінками, сумарна вартість утримання протягом 40 років у разі застосування тільки капремонтів може становити близько $640 тис., тоді як використання стратегії превентивних періодичних ремонтів – близько $364 тис., тобто в 1,64 менше. Таким чином, актуальним є пошук підходів до продовження терміну служби дорожніх покриттів за обмежених фінансових ресурсів, що дозволить забезпечити належний стан доріг без надзвичайно дорогих реконструкцій.

Постановка проблеми. Незважаючи на очевидні переваги превентивного ремонту, на сьогодні в Україні відсутня ефективна, науково обґрунтована технологія попереджувального ремонту дорожніх покриттів. Ті методи поверхневої обробки, що застосовувалися до 2004 року, не витримують навантажень від сучасного транспорту і швидко втрачають ефективність. Тонкошарові емульсійно-мінеральні покриття (мікросюрфейсінг), відомі у світі, не набули широкого застосування в Україні через високу вартість та технологічні труднощі при виконанні. В дорожніх науково-дослідних установах практично не розробляються нові матеріали для ремонтів ні для асфальтобетонних, ні для цементобетонних покриттів. У результаті ресурси на ремонт доріг використовуються неефективно, покриття передчасно доходять до аварійного стану. Обмежене фінансування та надзвичайні обставини (наприклад, військові дії) ще більше ускладнюють виконання планових капітальних ремонтів. Як наслідок, постає проблема забезпечення проїзного стану і довговічності доріг за відсутності можливості капітального відновлення конструкції.

Метою дослідження є обґрунтування та перевірка сучасних технічних рішень, що дозволяють продовжити термін служби дорожніх покриттів в умовах відкладення або відсутності капітального ремонту. Для досягнення цієї мети вирішуються завдання аналізу сучасних методів та матеріалів для поточного ремонту, дослідження міжнародного досвіду превентивного дорожнього утримання, а також апробація перспективної технології підвищення довговічності покриття на конкретному об’єкті (автодорозі М-13) із використанням полімерної добавки прямого введення до асфальтобетону.

Огляд сучасних методів та матеріалів ремонту. Поточний ремонт автомобільних доріг включає комплекс робіт з усунення локальних пошкоджень покриття, герметизації та відновлення поверхневих шарів. Найпоширенішими видами робіт є: ліквідація ямковості (ямковий ремонт), герметизація тріщин, поверхнева обробка або улаштування тонких верхніх шарів покриття. Для виконання ямкового ремонту нині застосовуються різні матеріали і технології. До традиційних належать гаряча асфальтобетонна суміш і литий асфальтобетон, що укладаються при температурі навколишнього середовища не нижче +5…+10 °С. Гарячий асфальтобетон є найбільш доступним і забезпечує довговічне відновлення, однак потребує роботи асфальтного заводу поблизу та дотримання технології ущільнення.

Холодна асфальтобетонна суміш є сучасною альтернативою для аварійного ремонту в холодну пору. Вона виготовляється за спеціальною технологією з використанням модифікованих добавок або бітумів: вміст бітуму складає ~4,2–4,5% від маси щебеню, а сумарна частка хімічних добавок – 15–25% від маси бітуму. Такий склад надає асфальту необхідну рухомість при низьких температурах та адгезію. Холодні органо-мінеральні суміші можуть зберігатися тривалий час (у тарі або навалом) і укладатися навіть при морозах до –10 °С (за умови сухої погоди).

Перевагою холодних сумішей є можливість цілорічного ремонту покриття, що актуально, оскільки покриття в осінньо-зимовий період руйнується інтенсивніше, а звичайні АБЗ в цей час не працюють. Недоліком є вища вартість такої суміші та дещо менша міцність ремонту порівняно з гарячим асфальтом.

Серед технологій ямкового ремонту набувають поширення також інфрачервоний ремонт та струминно-ін’єкційний метод. Інфрачервоний метод передбачає розігрів пошкодженої ділянки покриття спеціальною ІЧ-панеллю, розпушення існуючого асфальту, додавання нової суміші та повторне ущільнення. Це дозволяє “переплавити” дефект без вирізання карти, утворивши монолітну

безшовну латку; метод забезпечує добру якість, але потребує спеціального обладнання та є доцільним для відносно неглибоких дефектів.

Струминно-ін'єкційна технологія (так званий spray-injection ремонт) виконується автоматизованою установкою, яка під тиском подає у підготовлену вибоїну суміш бітумної емульсії та щебеневого відсіву. Матеріал змішується і ущільнюється повітряним струменем без застосування котка. Перевагами струминно-ін'єкційного методу є висока продуктивність, можливість працювати без повного перекриття дороги та за різних погодних умов, мінімальна участь ручної праці. За якістю та довговічністю такий ремонт дещо поступається традиційному гарячому асфальтобетону, проте дозволяє оперативно відновити проїзд із прийнятними витратами (особливо ефективний для дрібних вибоїн ранньою весною).

Окрім ямкового ремонту окремих місць, важливо забезпечити захист та відновлення цілісності верхнього шару покриття по всій поверхні дороги або на значних ділянках. Для цього застосовуються технології поверхневої обробки та тонкошарових покриттів (килимків зносу).

Поверхнева обробка – це улаштування захисного шару із бітумної емульсії та дрібного щебеню (одно- або двошарового) на існуюче покриття. Цей метод є відносно недорогим і швидким, не потребує складної техніки. Основна його функція – герметизація дрібних тріщин, недопущення потрапляння води в основу та відновлення шорсткості (когезії) поверхні за рахунок фрикційних властивостей нового щебеню.

У світовій практиці поверхневі обробки (chip seals) дуже поширені: щорічно в США виконується понад 800 млн м² таких покриттів як спосіб економічного продовження строку служби доріг.

Згідно з досвідом, для покращення довговічності поверхневих обробок важливе значення має якість матеріалів – зокрема, попереднє покриття щебеню бітумом (прекодування) значно підвищує його зчеплення з в'яжучим і запобігає відшаруванню. Проте для доріг з інтенсивним рухом традиційні поверхневі обробки можуть виявитися недостатньо стійкими: в Україні було відзначено, що виконані раніше (до 2004 р.) поверхневі обробки швидко втрачали свої експлуатаційні якості під дією сучасного великовагового транспорту.

Технологія тонкошарового покриття передбачає укладання по існуючому дорожньому одягу нового шару асфальтобетонної суміші малої товщини – як правило, 2–4 см (ультратонкий шар). Для цього використовуються дрібнозернисті щільні асфальтобетонні суміші, часто модифіковані (полімер-модифікований бітум, щебенево-мастиковий асфальтобетон тощо). В окремих випадках застосовується технологія ультратонкого пов'язаного покриття (Ultra-Thin Bonded Wearing Course), коли перед укладанням асфальтобетонної суміші товщиною ~20 мм на холодне старе покриття тонким шаром наноситься високоадгезійна емульсія; суміш укладається спеціальним комплексом (так звана синхронна поверхнева обробка).

Тонкошарові покриття дозволяють швидко відновити рівність і шорсткість дороги та запобігти подальшому зносу основного покриття. За даними зарубіжних досліджень, застосування ультратонких асфальтобетонних покриттів може знизити витрати на ремонт на ~30–40% у порівнянні зі звичайним ремонтом, а використання високоякісного щебеню підвищує коефіцієнт зчеплення (протитриння) покриття до 20%.

Багато дорожніх адміністрацій (наприклад, у США, Німеччині) для тонких профілактичних шарів вимагають використання полімер-модифікованого бітуму або спеціальних добавок, щоб забезпечити необхідну міцність і тріщиностійкість тонкого шару.

В Україні тонкошарові емульсійно-мінеральні суміші (аналоги мікросюрфейсингу) поки що не набули масового застосування через їх високу вартість та складність технології. Однак з точки зору перспектив забезпечення довговічності, саме такі покриття є важливим елементом стратегії превентивного обслуговування доріг, дозволяючи продовжувати службу покриття без капітального ремонту.

Наведені методи можуть застосовуватися як окремо, так і в поєднанні – залежно від стану дороги. Наприклад, тріщини бажано попередньо заповнити бітумною мастикою, значні ями – ліквідувати

ямковим ремонтом, після чого на всю поверхню ділянки може наноситися захисна тонкошарова обробка. Такий комплексний підхід забезпечує як лікування наявних дефектів, так і попередження нових, створюючи водонепроникний шар та відновлюючи текстуру покриття для покращення зчеплення шин. У цілому, світовий досвід свідчить, що своєчасне виконання дрібних та середніх за обсягом ремонтів дозволяє підтримувати прийнятний стан доріг при обмеженому бюджеті та значно відстрочити необхідність капітального ремонту.

Основна частина: практичний кейс (траса М-13).

Характеристика об'єкта. В якості практичного прикладу сучасного підходу розглянуто експлуатаційне утримання автомобільної дороги М-13 Кропивницький – Платонове (на м. Кишинів). Це дорожній маршрут державного значення, що був побудований ще у 1960-х роках і включає цементобетонне покриття.

За більш ніж 50 років без ґрунтовного ремонту бетонне покриття зазнало суттєвих руйнувань: багато плит розтріснулися і деформувалися, місцями утворилися провали, що перетворювало рух по дорозі на серйозну проблему. На окремих ділянках інтенсивність руху є доволі високою (маршрут з'єднує центральні області України з Молдовою), тому навантаження на дорожній одяг великі. Планом розвитку доріг передбачалося виконати капітальний ремонт траси М-13 по всій протяжності ще у 2021 році, проте через економічні труднощі та повномасштабне вторгнення 2022 року ці роботи були відкладені на невизначений термін. Водночас підтримувати дорогу в проїзному стані життєво необхідно, особливо враховуючи її значення для регіону.



Рисунок 1 – М-13 Стан покриття
Figure 1 – M-13 Pavement Condition

Застосоване рішення. У 2023 році Службою автомобільних доріг було ініційовано проведення аварійно-відновлювальних робіт на М-13 в рамках експлуатаційного утримання. Передусім були ліквідовані найбільш небезпечні руйнування: заповнено проломи й западини від зруйнованих бетонних плит, вирівняно місця просадок на підходах до штучних споруд (мостів). Після цього, як тимчасовий захід до проведення повного капремонту в майбутньому, було вирішено укласти на частині дороги тонкошаровий асфальтобетонний шар, модифікований спеціальною полімерною добавкою.

Метою було покращити цілісність і міцність верхнього шару покриття, герметизувати тріщини між плитами та вирівняти поверхню для безпечного руху. Враховуючи відсутність поблизу стаціонарного асфальтного заводу, для приготування асфальтобетонної суміші використали мобільну установку, куди безпосередньо в змішувач додавалась гранульована **полімерна добавка прямого (сухого) введення** у заданій дозі за допомогою дозатора целюлози. Ця технологія дозволяє отримати полімер-модифікований асфальтобетон без використання окремо приготовленого бітуму з полімером (тобто без стадії заводської модифікації бітуму в колоїдному млині).



Рисунок 2 – Дозатор целюлози і мобільний АБЗ
Figure 2 – Cellulose feeder and mobile asphalt mixing plant

Полімерна добавка являє собою термопластичний матеріал на основі поліолефінів, який рівномірно розподіляється у суміші при стандартній температурі приготування (≈170–175 °С) і суттєво підвищує її фізико-механічні показники. За рахунок «сухого» способу введення було досягнуто спрощення технології – модифікування суміші здійснювали безпосередньо на місці, у ході виконання робіт, без залучення спеціалізованих заводських потужностей.

Для пристрою тонкошарового покриття обрали щільну дрібнозернисту асфальтобетонну суміш типу Б (за ДСТУ Б В.2.7-119:2011) з максимальним розміром зерна 10 мм. Розрахункова товщина нового шару становила ~30 мм. Перед укладанням поверхню існуючого бетонного покриття очистили від бруду та пилу, виконали локальну розливку бітумної емульсії (праймування) для забезпечення зчеплення нового шару з основою.

Гарячу асфальтобетонну суміш з полімерною добавкою доставляли невеликими партіями безпосередньо до місця укладання і вкладали машинним способом (асфальтоукладальником) там, де це було можливо, а на дрібних локальних картах – вручну. Ущільнення виконували вібраційним котком вагою 6 т. Роботи проводили поетапно на окремих найбільш зруйнованих відрізках дороги загальною протяжністю близько 3 км. Важливо відмітити, що метод прямого введення майже єдина технологія що дозволяє випускати невеликі партії модифікованої суміші з стабільними характеристиками і без додаткових затрат на модифікований бітум, а також усуває ризи тривалого зберігання модифікованого бітуму.

Отримані результати. Одразу після ремонту вдалося досягти суттєвого покращення рівності дорожнього покриття – усунуто різкі перепади на стиках плит, згладжено хвилі та напливи, які утворилися на бетоні. За суб'єктивною оцінкою, їзда по відновленій ділянці стала значно комфортнішою та безпечнішою.

Шорсткість нового покриття (коефіцієнт зчеплення) теж підвищилася завдяки фрикційним властивостям щебеню в тонкому шарі, що позитивно впливає на гальмівний шлях автомобілів, особливо в дощову погоду. Наявність полімерної добавки сприяла підвищенню стійкості покриття до колієутворення та тріщин: лабораторними дослідженнями встановлено, що введення 1,5–4% термопластичного полімеру (від маси бітуму) під час приготування суміші збільшує опір асфальтобетону до пластичних деформацій (колії) у 2,5–3,8 раза. Навіть при менших дозах полімеру (~0,22% від маси суміші) очікуване підвищення колійностійкості становить 1,8–3,2 раза.

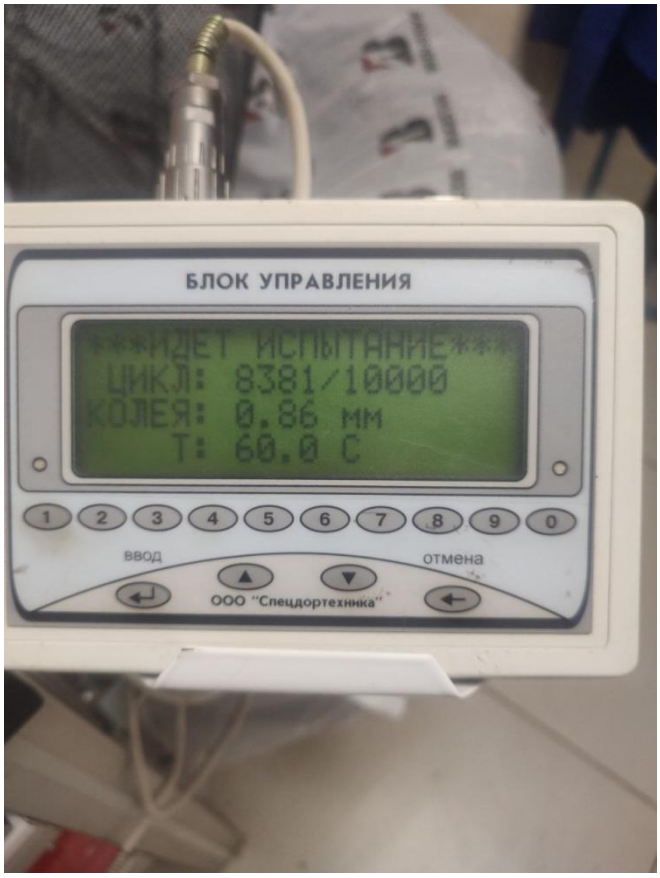


Рисунок 3 – Стійкість до колієутворення (колійність) за методом Гамбурзького колеса.
Figure 3 – Rutting resistance (rut depth) determined by the Hamburg Wheel Tracking Test.

В польових умовах це означає, що утворення нових колій і напливів на тонкому шарі значно сповільниться в порівнянні зі звичайним (немодифікованим) асфальтобетоном. Первинний огляд відремонтованих сегментів М-13 після літньо-осіннього експлуатаційного сезону показав відсутність помітних руйнувань: не спостерігалося ні сітки дрібних тріщин, ні вибоїн, навіть там, де під покриттям залишаються старі бетонні плити. Герметизуючий ефект шару запобіг потраплянню води у старе покриття, що особливо критично в осінньо-зимовий період.

Таким чином, виконаний добавки прямого введення забезпечує продовження строку служби проблемної ділянки дороги принаймні на найближчі роки. За оцінками фахівців, покриття залишатиметься в задовільному стані не менше 3–5 років за умови належного ямкового ремонту поодиноких ушкоджень, що можуть виникати. Це підтверджує загальний висновок, що навіть за обмежених бюджетів використання модифікованої суміші здатне подовжити строк служби дороги на кілька років, сповільнюючи зношування основного покриття.

Економічна ефективність. Застосований підхід має відносно невеликі додаткові витрати порівняно з капітальним ремонтом. Орієнтовне здорожчання модифікованого асфальтобетону за рахунок добавок прямого (сухого) введення становить близько 220–260 грн/т суміші, що є менше 4% від вартості ямкового/поточного ремонту в перерахунку на одиницю обсягу. Водночас термін експлуатації відремонтованої ділянки збільшується у 3–4 рази без додаткових втручань. Економія досягається завдяки простоті технології та відсутності додаткових операцій. У порівнянні з капітальним ремонтом, який зазвичай відкладається на 3–7 років, відносне здорожчання нинішнього рішення становить менше 0,5% від повної кошторисної вартості по життєвому циклу ділянки.

Окрім прямих витрат, варто враховувати й опосередковані вигоди: швидке виконання робіт

дозволяє уникнути тривалих обмежень руху на міжнародному маршруті, що мінімізує втрати від об'їздів. Отже, методика «малої крові» дала змогу зберегти працездатність дороги, витративши суттєво менше коштів, ніж потребує повний ремонт. Навіть якщо у наступні роки буде реалізовано запланований капітальний ремонт М-13, уже влаштований полімер-модифікований тонкий шар забезпечив відчутний виграш у часі та ресурсах. У підсумку, світовий і локальний досвід підтверджує: стратегія планомірних превентивних заходів дозволяє знизити сукупні витрати на утримання в розрахунку на життєвий цикл понад на 30%, що корелює з результатами в даному кейсі..

Висновки. **Актуальність превентивних ремонтів.** В умовах обмеженого фінансування або форс-мажорних обставин, що не дозволяють вчасно виконувати капітальний ремонт доріг, необхідно впроваджувати сучасні підходи до підтримання довговічності існуючих покриттів. Досвід утримання дороги М-13 показав, що навіть сильно зношене покриття можна стабілізувати на певний час за допомогою відносно простих та доступних технологій.

Ефективність полімерних добавок прямого (сухого) введення. Полімерні модифікатори, що вводяться безпосередньо у змішувач асфальтобетону, забезпечують відчутне зростання колієстійкості та тріщиностійкості суміші (орієнтовно в 2–4 рази за опором пластичним деформаціям), підвищують адгезію та водостійкість, зменшуючи ризик вторинних руйнувань. Технологія не потребує окремого виготовлення полімер-модифікованого бітуму, сумісна зі стандартним обладнанням АБЗ і придатна для віддалених об'єктів. Додаткові витрати на тонну суміші невеликі (порядку 220–260 грн/т), тоді як міжремонтний інтервал зростає у 3–4 рази за умови дотримання режимів дозування та перемішування. Важливо, що такі добавки не замінюють необхідності усунення конструктивних дефектів основи, але істотно підсилюють ресурс саме ремонтованого шару та підвищують окупність поточного/ямкового ремонту.

Технологічні переваги та особливості полімерних добавок прямого (сухого) введення. Метод не потребує складної техніки чи спеціалізованого обладнання для модифікації бітуму: гранульований/порошковий модифікатор додається безпосередньо у змішувач під час приготування асфальтобетонної суміші. Рішення сумісне зі стандартними АБЗ (стаціонарними та мобільними), спрощує логістику й дозволяє оперативно випускати модифіковану суміш поблизу об'єкта ремонту, що критично для віддалених ділянок. До ключових вимог належать коректне дозування, забезпечення рівномірного розподілу добавки, дотримання температурних режимів і регламенту перемішування/ущільнення. У результаті підвищуються колієстійкість і тріщиностійкість, поліпшується адгезія та водостійкість, зменшується ризик вторинних руйнувань. Відсутність окремої стадії виготовлення полімер-модифікованого бітуму (ПМБ) скорочує час, знижує операційні ризики (перегрів, старіння в'яжучого під час транспортування) і дає змогу гнучко адаптувати рецептуру під конкретні умови об'єкта. Такий підхід підвищує окупність поточного/ямкового ремонту за рахунок покращення експлуатаційних властивостей суміші при мінімальному зростанні собівартості.

Економічна та екологічна доцільність полімерних добавок прямого (сухого) введення. Використання гранульованих/порошкових модифікаторів із прямим введенням у змішувач під час приготування асфальтобетону забезпечує **суттєве зниження сукупних витрат на утримання** завдяки подовженню міжремонтного інтервалу та скороченню кількості повторних втручань. Додаткові витрати на матеріал зазвичай невеликі (орієнтовно **220–260 грн/т,** що становить **<4%** від вартості робіт у перерахунку на обсяг), тоді як **експлуатаційний ресурс зростає у 3–4 рази.** Окрім прямих заощаджень, **є опосередковані вигоди**: менше перекриттів руху та простоїв транспорту, нижчі логістичні витрати (не потрібне окреме виробництво і доставка ПМБ), гнучкість у випуску суміші на віддалених об'єктах.

Екологічний ефект досягається через **меншу частоту ремонтів** (менше демонтажу покриття та відходів), **скорочення ланцюжка операцій** (відсутня стадія окремого приготування ПМБ і його транспортування), а також **зниження сумарного енергоспоживання** за життєвий цикл ділянки. У підсумку пряме введення полімерних добавок зменшує вуглецевий слід утримання дороги та підвищує ресурсну ефективність без зміни базової технології приготування та укладання асфальтобетону.

Перспективи масштабування. Технологія **прямого (сухого) введення полімерних добавок** в асфальтобетон може бути масштабована на мережу доріг України, особливо там, де капітальні роботи відкладені або тимчасово неможливі. Для системного впровадження доцільно:

1. розширити прикладні дослідження (дози, типи полімерів, сумісність із місцевими матеріалами, вплив на показники коліє- та тріщиностійкості, водостійкість);
2. адаптувати нормативну базу: передбачити в ДБН/ДСТУ чіткі вимоги до рецептур, протоколів контролю якості на АБЗ (однорідність змішування, температурні режими, методики випробувань) і приймальних критеріїв на об'єкті;
3. запровадити типові ТТК для різних сценаріїв поточного/ямкового ремонту з прямим введенням (стаціонарні та мобільні АБЗ, зимово-міжсезонні умови тощо);
4. організувати навчання персоналу АБЗ та підрядників (дозування, порядок внесення, контроль однорідності, час/температура змішування, вимоги до ущільнення);
5. застосовувати LCCA (оцінку життєвого циклу) при плануванні ремонтів, щоб фіксувати економічний ефект від подовження міжремонтних інтервалів;
6. розгорнути пілотні програми в кількох кліматичних зонах і на різних інтенсивностях руху з подальшим моніторингом і публічними звітами.

Такий підхід дозволить дорожнім службам масштабно і впевнено застосовувати пряме введення полімерних модифікаторів, підвищуючи довговічність ремонтів за мінімального зростання собівартості та без зміни базової технології виробництва і укладання асфальтобетону.

Загальний висновок. Сучасні підходи до підвищення довговічності дорожніх покриттів у разі неможливості капітального ремонту — насамперед використання полімерних добавок прямого (сухого) введення в асфальтобетон, а також якісний ямковий ремонт і герметизація тріщин — довели ефективність як практична альтернатива відтермінованому капремонту. За грамотного застосування ці рішення дозволяють зберегти несучу здатність і функціональність дороги, підвищити безпеку руху та оптимізувати витрати за рахунок подовження міжремонтних інтервалів. Результати впровадження на дорозі М-13 підтверджують, що періодична превентивна стратегія з прямим введенням полімерних модифікаторів може успішно реалізовуватися на практиці, забезпечуючи виграш у часі до наступного масштабного ремонту та раціональне використання ресурсів. Накопичений досвід є підставою для розроблення типових рішень і галузевих програм із подовження строків служби доріг по всій Україні.

Перелік посилань

1. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. – К.: Мінрегіонбуд України, 2015.
2. ВБН В.2.3-218-178-2004 Споруди транспорту. Влаштування поверхневих обробок покриття автомобільних доріг на основі бітумних емульсій.
3. ВБН В.2.3-218-532:2007 Споруди транспорту. Влаштування тонкошарових покриттів на автомобільних дорогах державного значення.
4. Р В.3.2-218-03449261-728:2008 Рекомендації по застосуванню тонкошарових покриттів при поточному ремонті автомобільних доріг.
5. ДСТУ Б Д.2.4-18:2014 (Збірник 18). Ресурсні елементні кошторисні норми на ремонтно-будівельні роботи. Благоустрій.
6. СОУ 45.2-00018112-036:2009. Бітуми та бітумополімери рідкі. Технічні умови.
7. ДСТУ-Н Б В.2.3-38:2016. Настанова з влаштування захисних шарів зносу покриття дорожнього одягу автомобільних доріг.
8. Howard, I.L., Jordan, W.S., Barham, J.M., Alvarado, A., Cox, B.C. (2013). Performance Oriented Guidance for Mississippi Chip Seals. Final Report FHWA/MS-DOT-RD-13-211. Mississippi DOT, Jackson, MS.
9. Kandhal, P.S., Motter, J.B. (1991). Criteria for Accepting Precoated Aggregates for Seal Coats and Surface Treatments. Transportation Research Record, 1300, 80–89.

10. Zhdaniuk, V., Volovyk, O., Kostin, D., Lisovin, S. (2021). An Investigation of the Effect of Thermoplastic Additives in Asphalt Concrete Mixtures on the Properties of Different Types of Asphalt Concrete. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/6(110), 61–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.227806.

11. Ergun, M., İyinam, S., İyinam, A. (2005). Prediction of Road Surface Friction Coefficient Using Only Macro and Microtexture Measurements. Journal of Transportation Engineering, 131(4), 311–319. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:4(311).

12. Abualia, A., Elnaml, I., Mohammad, L., Cooper III, S.B., Cooper Jr, S.B. (2025). Assessing Mechanical Properties and Structural Contribution of Thin Asphalt Mixtures Containing Polymer and Epoxy Modified Asphalt Binders. [Препринт]. SSRN. DOI: 10.2139/ssrn.5191322.

13. Latifi, A., Hayati, P., Goli, A. (2025). Advancing Pavement Preservation: Comprehensive Analysis and Optimization of Microsurfacing Mixtures with Stabilizers, Bitumen Types, Emulsifiers, and Fiber Impacts. Case Studies in Construction Materials, 22, e04622.

14. Guo, M., Zhang, R., Du, X., Liu, P. (2024). A State-of-the-Art Review on the Functionality of Ultra-Thin Overlays towards a Future Low Carbon Road Maintenance. Engineering, 32, 82–98.

15. Jwaida, Z., Dulaimi, A., Mydin, M.A.O., Özkılıç, Y.O., Jaya, R.P., Ameen, A. (2023). The Use of Waste Polymers in Asphalt Mixtures: Bibliometric Analysis and Systematic Review. Journal of Composites Science, 7(10), 415.

16. Habbouche, J., Hajj, E.Y., Piratheepan, M., Sebaaly, P.E. (2020). Impact of High Polymer Modification on Reflective Cracking Performance Life of Asphalt Concrete Overlays. International Journal of Pavement Research and Technology, 13(5), 510–523.

17. Rada, G.R., Bryce, J.M., Visintine, B.A., Hicks, R.G., Cheng, D. (2018). Quantifying the Effects of Preservation Treatments on Pavement Performance. NCHRP Research Report 858. Вашингтон, D.C.: Transportation Research Board.

18. Gilliland, A., Mohanraj, K., Taghavi Ghalesari, A. (2022). High Performance Thin Overlays: New Jersey Department of Transportation (Case Study). Звіт FHWA-HIF-22-053. Вашингтон, D.C.: Federal Highway Administration.

MODERN APPROACHES TO ENSURING PAVEMENT DURABILITY IN THE ABSENCE OF MAJOR REPAIRS

Dovban Mykola V., Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010,
e-mail: dovban.lru@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-8724-1994

Summary. An analysis of modern approaches to improving the durability of highways in conditions where major repairs cannot be carried out has been performed. Traditional and alternative methods of patch and routine repairs are considered, including thin-layer overlays and polymer additives, along with examples of international experience in extending pavement service life. As a practical case, the paper presents the maintenance of the M-13 highway using a polymer additive introduced directly (dry method) into asphalt concrete. The repair technology, results of pavement condition improvement, and economic efficiency are described. Conclusions are drawn regarding the effectiveness, technological advantages, and scalability prospects of such approaches for ensuring pavement durability without major repairs.

Keywords: durability, pavement, patch repair, thin-layer overlay, polymer additive, preventive maintenance.

References

1. DBN V.2.3-4:2015 “Automobile Roads. Part I: Design. Part II: Construction.” – Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2015.

2. VBN V.2.3-218-178-2004 “Transport Structures. Construction of Surface Treatments on Road Pavements Using Bituminous Emulsions.”
3. VBN V.2.3-218-532:2007 “Transport Structures. Construction of Thin-Layer Pavements on National Highways.”
4. R V.3.2-218-03449261-728:2008 “Guidelines on the Use of Thin-Layer Pavements for Routine Maintenance of Highways.”
5. DSTU B D.2.4-18:2014 (Collection 18). Resource Element Cost Norms for Repair and Construction Works. Land Improvement.
6. SOU 45.2-00018112-036:2009. Liquid Bitumens and Bitumen-Polymers – Specifications.
7. DSTU-N B V.2.3-38:2016. Guidelines on Construction of Protective Wearing Course Layers for Road Pavements.
8. Howard, I.L., Jordan, W.S., Barham, J.M., Alvarado, A., Cox, B.C. (2013). Performance Oriented Guidance for Mississippi Chip Seals. Final Report No. FHWA/MS-DOT-RD-13-211. Mississippi Department of Transportation, Jackson, MS.
9. Kandhal, P.S., Motter, J.B. (1991). Criteria for Accepting Precoated Aggregates for Seal Coats and Surface Treatments. Transportation Research Record, 1300, 80–89.
10. Zhdaniuk, V., Volovyk, O., Kostin, D., Lisovin, S. (2021). An Investigation of the Effect of Thermoplastic Additives in Asphalt Concrete Mixtures on the Properties of Different Types of Asphalt Concrete. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/6(110), 61–70. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.227806.
11. Ergun, M., İyınam, S., İyınam, A. (2005). Prediction of Road Surface Friction Coefficient Using Only Macro and Microtexture Measurements. Journal of Transportation Engineering, 131(4), 311–319. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:4(311).
12. Abualia, A., Elnaml, I., Mohammad, L., Cooper III, S.B., Cooper Jr, S.B. (2025). Assessing Mechanical Properties and Structural Contribution of Thin Asphalt Mixtures Containing Polymer and Epoxy Modified Asphalt Binders. [Preprint]. SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.5191322.
13. Latifi, A., Hayati, P., Goli, A. (2025). Advancing Pavement Preservation: Comprehensive Analysis and Optimization of Microsurfacing Mixtures with Stabilizers, Bitumen Types, Emulsifiers, and Fiber Impacts. Case Studies in Construction Materials, 22, Article e04622. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04622.
14. Guo, M., Zhang, R., Du, X., Liu, P. (2024). A State-of-the-Art Review on the Functionality of Ultra-Thin Overlays Towards a Future Low Carbon Road Maintenance. Engineering, 32, 82–98. https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.03.011.
15. Jwaida, Z., Dulaimi, A., Mydin, M.A.O., Özkılıç, Y.O., Jaya, R.P., Ameen, A. (2023). The Use of Waste Polymers in Asphalt Mixtures: Bibliometric Analysis and Systematic Review. Journal of Composites Science, 7(10), 415. https://doi.org/10.3390/jcs7100415.
16. Habbouche, J., Hajj, E.Y., Piratheepan, M., Sebaaly, P.E. (2020). Impact of High Polymer Modification on Reflective Cracking Performance Life of Asphalt Concrete Overlays. International Journal of Pavement Research and Technology, 13(5), 510–523.
17. Rada, G.R., Bryce, J.M., Visintine, B.A., Hicks, R.G., Cheng, D. (2018). Quantifying the Effects of Preservation Treatments on Pavement Performance. NCHRP Research Report 858. Washington, DC: Transportation Research Board. https://doi.org/10.17226/25298.
18. Gilliland, A., Mohanraj, K., Taghavi Ghalesari, A. (2022). High Performance Thin Overlays: New Jersey Department of Transportation (Case Study). Report FHWA-HIF-22-053. Washington, DC: Federal Highway Administration.

UDC539.3:622.24 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-047-062**
УДК539.3:622.24

MATHEMATICAL MODEL OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS ATTENDING DRIVAGE OF THE DEEP CURVILINEAR BORE-HOLES

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ БУРІННЯ ГЛИБОКИХ КРИВОЛІНІЙНИХ СВЕРДЛОВИН



Levkivska Liudmyla V., *PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of Higher Mathematics Department, e-mail: l.v.g.ntu@gmail.com, tel. +380505114407, Ukraine, 01103, Kyiv, Boychuka str., 42, of. 514,*

https://orcid.org/0000-0002-5589-5257



Gorbunovich Iryna V., *PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of Higher Mathematics Department, e-mail: irina.gorbunovich@gmail.com, tel. +380676001177, Ukraine, 01103, Kyiv, Boychuka str.,42, of. 514*

https://orcid.org/0000-0002-6859-0663

Summary: This article examines the process of deformation of the drill string, during which it bends and comes into contact with the walls of an oil and gas well, continuing to change its shape under the influence of increasing axial force, distributed contact load, and torque.

The purpose of the work is to construct nonlinear differential equations describing the contact interaction of the drill string pipe with the well wall, to propose a method for their numerical solution, and to present the results of computer modeling.

Research methods are theoretical and experimental.

This study develops a mathematical model to describe the mechanical interactions of a drill string with the wellbore during drilling, lowering, and raising operations. The model is based on the theory of curvilinear flexible rods and accounts for internal and external force factors, including contact and friction forces, gravity, and drilling fluid effects. A system of nonlinear differential equations is formulated to describe the stress-strain state of the drill string, incorporating geometric imperfections in the borehole trajectory. Computational simulations assess the impact of various borehole curvature conditions on drill string behavior, revealing significant influences on bending moments, frictional forces, and potential drill string seizure zones.

The practical application of the obtained results lies in improving methods for predicting emergency situations related to drill string sticking and developing recommendations for selecting optimal drilling parameters.

The obtained results make it possible to assess the likelihood of emergency situations, optimize drilling modes to enhance process efficiency, minimize equipment wear, and reduce the risks of accidents during the development of oil and gas fields.

Keywords: curvilinear drilling, borehole, geometrical imperfections, internal and external forces, direct and inverse problems.

Statement of the problem in general terms and its connection with important scientific and practical tasks. At present, approximately 90% of all energy consumed comes from fossil hydrocarbon fuels, with oil and gas being the primary contributors. Their prices are sharply rising due to increasingly complex extraction conditions and the approaching depletion of reserves. Nevertheless, the search for new oil and gas reserves and the progressively increasing rate of their extraction continue, underscoring the critical role of these resources in the global energy and economy. The principal technological component of these processes is the drilling of new oil and gas bores.

The most promising reserves of the remaining proven hydrocarbon resources are predominantly concentrated at great depths and in shelf zones far from dry land. This situation is compounded by the fact that, as a rule, only 40% of the hydrocarbon fuels that fill pores and cracks of underground deposits can be extracted using traditional technology, which involves drilling vertical boreholes. This low extraction efficiency leads to significant losses of valuable energy resources and creates both economic and environmental challenges.

An effective means to significantly enlarge extraction efficiency is to drill boreholes in inclined and horizontal manners. Since the early 2020s, advancements in drilling and completion technologies have made drilling these types of boreholes much more economical. Curvilinear boreholes allow penetration into oil- and gas-bearing strata along the laminated structure of the underground formations and covering larger zones of fuel output. This not only increases extraction volumes from existing fields but also opens access to previously inaccessible or economically unviable reserves.

Nevertheless, despite significant progress in the practical application of curvilinear drilling, the theoretical simulation methods for the mechanical effects accompanying the processes of curvilinear borehole drilling are not sufficiently advanced. There is a critical need for the development of more accurate and comprehensive theoretical models that account for the complex interactions between the drilling tool, rock, and fluid in non-linear trajectories.

Therefore, the development of advanced theoretical modeling methods for mechanical effects during curvilinear drilling is not only a scientific endeavor but also a critically important practical necessity for ensuring sustainable and economically efficient hydrocarbon extraction in the future. This problem is directly linked to energy security, economic stability, and reducing humanity's environmental footprint.

Analysis of publications in which research on this problem has been initiated and on which the authors rely. In work [1] the authors proposed a coil optimization method for ultra-deep electromagnetic logging while drilling, enhancing measurement accuracy in high-depth environments. The importance of precision directional drilling as a means of minimizing trajectory deviations and improving process efficiency was emphasized in [2].

A study explored the application of long-reach directional boreholes for gas drainage under complex geological conditions [3]. Experimental investigations were also conducted into the hydraulic fracturing properties of elliptical boreholes, simulating the effect of geometric anomalies [4].

Drill string buckling in complex boreholes was analysed, accounting for curvature-related effects [5]. A stochastic model of the nonlinear dynamic behaviour of horizontal drill strings, incorporating frictional and impact effects, was proposed [6]. Study [7] explores the key technologies and practical applications of deep borehole pneumatic directional drilling specifically adapted for challenging broken-soft coal seams. The paper [8] provides an analytical evaluation of the inertial properties of drill strings during their rotation.

The practical implementation of the technology for drilling wells of complex spatial orientation requires appropriate mathematical modelling for the design of their rational trajectories and the use of state-of-the-art equipment and technology for their drivage [9]. As this takes place, the most interesting issues are those for determining the external and internal forces as well as the torques acting on the drill strings in the curvilinear

borehole in the processes of its tripping in/out and drilling [10]. Modelling resistance forces and dynamic phenomena accompanying well drilling makes it possible to solve such fundamental problems as obtaining the required trajectory of the well and reducing the longitudinal and transverse vibrations of the strings as well as reducing the forces of contact and friction interaction between the string and the well wall, thereby achieving a reduction in wear of the drill string and the lock joints, eliminating unplanned bending of the centreline of the well, and, as a consequence, eliminating complex abnormal situations in the drilling process[11]. These forces can only be calculated according to the theory of flexible curvature rods [12].

Presentation of the main research material. The borehole drivage process involves three main technological operations, differing by the operating regimes and by schemes of contact and friction interactions between the drill string (DS) and bore-hole surfaces. Among these are the drilling operation, which is main one, as well as the operations of the DS raising and lowering, performed for the change of dulled bits or for other technological needs. In performing each of them, the initiation of unforeseen and impermissible situations is possible, which are distinct from each other by combinations of force actions related to dissimilar manifestations and consequences.

With the aim to set up the problem about calculation of the external and internal quasi-static forces acting on a curvilinear DS at different stages of its functioning, take into account that usually the curvature radii of the bore-hole axes exceed hundreds of meters, the DS lengths equal several kilometers, but the clearances between the DS and bore-hole surfaces generally are 0,1 – 0,15 m. This permits one to assume that in the state of the DS operation its elastic line acquires the shape constrained by the bore-hole axis line and is prescribed.

As a rule, imposition of additional constraints on a mechanical system reduces its number of degrees of freedom and number of required variables, though entails the necessity to calculate additionally reactions of these constraints (contact forces). So, in the considered case, the functions of the internal moments and shear forces acting in the DS are calculated via simple formulas and can be known. Then, the direct problem of the theory of quasi-statics of curvilinear flexible rods can be stated for determination of internal longitudinal force and torque, while the external forces of contact and friction interaction between the DS and bore-hole wall (the constraint reactions) can be calculated through the statement of an inverse problem. With this approach the behavior of the DS in curvilinear borehole can be described, the zones of possible seizure of the DS can be detected and the measures for the DS jarring and release can be designed. In this case, it is conveniently to use the theory of curvilinear flexible rods to describe the stress-strain state of the DS.

Let geometry of a bore-hole axis line be prescribed and determined by the equation:

$$\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{\rho}(s) \tag{1}$$

in the Cartesian coordinate system $Oxyz$. Here $\boldsymbol{\rho}$ is the radius-vector $\boldsymbol{\rho} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$; $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$ are the appropriate unit vectors; S is the parameter measured by the length of the axial line of the bore-hole; $x(s)$, $y(s)$, $z(s)$ are the differentiable functions describing the trajectory of the bore-hole axis with any geometrical imperfections.

To describe mechanics of the drill string inside the borehole, it is suitable to introduce a moving right-handed system of axes (u, v, w), whose orientation is rigidly connected with the cross-section of interest at a generic point of the DS tube axis line. The origin of this system lies at the center of gravity of the cross-sectional area, the u – and v –axes are directed along the principal central axes of inertia of the cross-sectional area, and the w –axis is directed along the tangent to the elastic line.

The Frenet natural trihedron of the elastic line of the rod with unit vectors of the principal normal $\mathbf{n}$, binormal $\mathbf{b}$ and tangent $\boldsymbol{\tau}$ is also introduced, which is determined by the formulas:

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d\boldsymbol{\rho}}{ds}, \qquad \mathbf{n} = R\frac{d\boldsymbol{\tau}}{ds}, \qquad \mathbf{b} = \boldsymbol{\tau} \times \mathbf{n}. \tag{2}$$

Assuming that the tube cross-section dimensions are very small in comparison with its length and curvature radius of its axial line, one can consider the DS geometry to coincide with the bore-hole geometry and the tube material strains to be elastic. Then, the equations of a DS element equilibrium under action of internal forces ($\mathbf{F}$) and moments ($\mathbf{M}$), and external forces ($\mathbf{f}$) and moments ($\mathbf{m}$) can be represented in the form:

$$\frac{d\mathbf{F}}{ds} = -\mathbf{f}, \qquad \frac{d\mathbf{M}}{ds} = -\boldsymbol{\tau} \times \mathbf{M} - \mathbf{m}. \tag{3}$$

Inasmuch as the DS is curvilinear, it is useful to consider equilibrium of its element relative to a reference frame connected with that. Usually for this aim the system of axes u, v, w is used. As this system rotates with its movement along the s axis line, the total derivatives $d\mathbf{F}/ds$, $d\mathbf{M}/ds$ should be expressed in the following form:

$$\frac{d\mathbf{F}}{ds} = \frac{\tilde{d}\mathbf{F}}{ds} + \boldsymbol{\omega}_\chi \times \mathbf{F}, \qquad \frac{d\mathbf{M}}{ds} = \frac{\tilde{d}\mathbf{M}}{ds} + \boldsymbol{\omega}_\chi \times \mathbf{M}, \tag{4}$$

where $\tilde{d}\,\mathrm{K}/ds$ is the local derivative; $\boldsymbol{\omega}$ is the vector of the system (u, v, w) rotation velocity when its origin is moving with unit velocity along the bore-hole axis line:

$$\boldsymbol{\omega} = k_R\mathbf{b} + \left(k_T + d\chi/ds\right)\boldsymbol{\tau}. \tag{5}$$

Here k_R and k_T are the absolute curvature and torsion calculated through the formulae:

$$k_R = \left|\frac{d^2\boldsymbol{\rho}}{ds^2}\right|, \qquad k_T = \boldsymbol{\tau} \cdot \left(\mathbf{n} \times \frac{d\mathbf{n}}{ds}\right). \tag{6}$$

Inasmuch as the DS is very long in comparison with its diameter and its reshaping is caused by bending in the bore-hole channel, its elastic elongation can be neglected. Then the forces F_u, F_v, F_w are purely static factors and can be determined from the equilibrium conditions. The components M_u, M_v, M_w of the principal vector $\mathbf{M}$ are calculated with the use of the Hooke law. The initial curvature and torsion of the DS are taken as zero. Then:

$$M_u = Ap, \qquad M_v = Aq, \qquad M_w = Cr, \tag{7}$$

where $A = EI$, $C = GI_w$ are the bending and torsion stiffness factors; E, G – the elastic and shear modules of elasticity; I, I_w – the axial and polar inertia moments of the drill string tube cross-section.

With the above expressions, the curvatures p, q in the (u, v, w) system and elastic torsion r are calculated as:

$$p = k_R \sin\chi, \qquad q = k_R \cos\chi, \qquad r = k_T + \frac{d\chi}{ds}, \tag{8}$$

where χ is the angle between the unit vector $\mathbf{n}$ and axis u.

The geometry parameters determined by Eqs. (1), (2), (5), (6), (8) do not vary with the DS deforming, while the functions $p(s)$, $q(s)$, $r(s)$ evolve at the DS torsion and should be found at every step of its loading.

So, the vectors $\mathbf{F}$, $\mathbf{M}$, $d\mathbf{F}/ds$, $d\mathbf{M}/ds$ and $\boldsymbol{\omega}_\chi$ have the components F_u, F_v, F_w, M_u, M_v, M_w, dF_u/ds, dF_v/ds, dF_w/ds, dM_u/ds, dM_v/ds, dM_w/ds and p, q, r, correspondingly. Then Eqs. (4) can be represented in the scalar form:

$$\begin{aligned} dF_u/ds &= -qF_w + rF_v - f_u, \\ dF_v/ds &= -rF_u + pF_w - f_v, \\ dF_w/ds &= -pF_v + qF_u - f_w \end{aligned} \tag{9}$$

for the force equilibrium and in the same form:

$$\begin{aligned} dp/ds &= (Brq - Cqr + F_v - m_u)/A, \\ dq/ds &= (Cpr - Arp - F_u - m_v)/B, \\ dr/ds &= (Aqp - Bpq - m_w)/C \end{aligned} \tag{10}$$

for the moments equilibrium.

They can be used for modeling the considered quasi-static states. Since the lowering-raising operations and bore-hole drilling are differing each from other by modes of the drill string motion, schemes and values of the external force $\mathbf{f}$ distribution and developing emergency situations, they should be considered individually.

In a general case, the functions $\mathbf{f}(s)$ and $\mathbf{m}(s)$ can be represented through the gravitational force $\mathbf{f}^{gr}(s)$, contact force $\mathbf{f}^{c}(s)$, frictional force $\mathbf{f}^{fr}(s)$, inertia force $\mathbf{f}^{l}(s)$ of the liquid (mud) moving inside the tube, and torsion moment $\mathbf{m}(s)$ as follows:

$$\mathbf{f}(s) = \mathbf{f}^{gr}(s) + \mathbf{f}^{c}(s) + \mathbf{f}^{fr}(s) + \mathbf{f}^{l}(s), \qquad \mathbf{m}(s) = m_w^{fr}(s) \cdot \boldsymbol{\tau}. \tag{11}$$

The gravitation force is known, it has three components:

$$f_u^{gr} = -gF(\gamma_t - \gamma_l)(n_z \cos\chi + b_z \sin\chi),$$
$$f_v^{gr} = gF(\gamma_t - \gamma_l)(n_z \sin\chi - b_z \cos\chi), \quad (12)$$
$$f_w^{gr} = -gF(\gamma_t - \gamma_l)\tau_z,$$

where F is the area of the cross-section of the drill string, γ_t is the tube material density, and γ_l is the density of the washing liquid.

The contact force $\mathbf{f}^c(s)$ is required one. It is normal to the axial line of the DS and has components f_u^c and f_v^c.

The DS routinely experiences the axial motion with velocity $\dot{w}$ and rotates with angular velocity ω at a time. Then the total friction force as given below:

$$\left|f^{fr}\right| = \mu\left|f^c\right| = \mu\sqrt{\left(f_u^c\right)^2 + \left(f_v^c\right)^2}$$

can be decomposed into the axial and circumferential components:

$$f_w^{fr} = \pm\mu \cdot f^c \frac{\dot{w}}{\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d_e/2)^2}}, \qquad f_\omega^{fr} = \pm\mu \cdot f^c \frac{\omega d_e}{2\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d_e/2)^2}}, \quad (13)$$

which are proportional to the appropriate components of velocities $\dot{w}$ and $\omega d_e/2$. Here d_e is the external diameter of the drill string tube.

The f_w^{fr} force impedes the axial movement of the DS, while the second one acts in the circumferential direction, resulting in the distributed friction moment:

$$m_w^{fr} = f_\omega^{fr} \cdot \frac{d_e}{2} = \pm\mu \cdot f^c \frac{\omega d_e^2}{4\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d_e/2)^2}}. \quad (14)$$

The signs "±" in Eqs. (13) and (14) should be chosen depending on the directions of movement and rotation of the DS. The sign "–" in the expression for f_w^{fr} corresponds to the procedure of the drill string raising, whereas the sign "+" relates to the processes of lowering and drilling.

The $\mathbf{f}^l$ force is determined as follows:

$$\mathbf{f}^l = -\pi d_i^2 \gamma_l V^2 k_R \mathbf{n}/4. \quad (15)$$

Here d_i is the internal radius of the drill string tube, V is the mud velocity.

As a rule, in solving the practical problems for a curvilinear rod with complicated axial line, it is difficult to choose the s variable, which parameterizes the geometry of the rod. Thus, one is forced to select, instead,

some dimensionless parameter ϑ. In this case, the substitution $ds = Dd\vartheta$ should be performed, where D is the metric multiplier calculated by the following formula:

$$D = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}.$$

Here the dot above a letter denotes differentiation with respect to ϑ.

With these substitutions and introduction of the designations $\chi = h_1$, $d\chi/d\vartheta = dh_1/d\vartheta = h_2$, Eqs. (9), (10) are brought to the form:

$$\begin{aligned}
\frac{dF_u}{Dd\vartheta} &= \left(k_T + \frac{h_2}{D}\right)F_v - k_R \cos h_1 \cdot F_w - f_u^{gr} - f_u^c, \\
\frac{dF_v}{Dd\vartheta} &= k_R \sin h_1 \cdot F_w - \left(k_T + \frac{h_2}{D}\right)\cdot F_u - f_v^{gr} - f_v^c, \\
\frac{dF_w}{Dd\vartheta} &= k_R \cos h_1 \cdot F_u - k_R \sin h_1 \cdot F_v - f_w^{gr} - f_w^{fr}.
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{D}\left[\frac{dk_R}{d\vartheta}\sin h_1 + k_R \cos h_1 \cdot h_2\right] &= \frac{A-C}{A}\cdot k_R \cos h_1\left(k_T + \frac{h_2}{D}\right) + \frac{F_v}{A}, \\
\frac{1}{D}\left[\frac{dk_R}{d\vartheta}\cos h_1 - k_R \sin h_1 \cdot h_2\right] &= \frac{C-A}{A}\cdot k_R \sin h_1\left(k_T + \frac{h_2}{D}\right) - \frac{F_u}{A}, \\
\frac{1}{D}\left[\frac{dk_T}{d\vartheta} - \frac{1}{D^2}\frac{dD}{d\vartheta}h_2 + \frac{1}{D}\frac{dh_2}{d\vartheta}\right] &= -\frac{m_w^{fr}}{C}.
\end{aligned} \tag{17}$$

In this system, four functions $F_u(\vartheta)$, $F_v(\vartheta)$, $F_w(\vartheta)$, $h_1(\vartheta)$,which determine the stress-strain state of the DS, are required. The external distributed forces of contact $\left(f_u^c(\vartheta),\ f_v^c(\vartheta)\right)$, friction interaction $\left(f_w^{fr}(\vartheta)\right)$ and friction moment $m_w^{fr}(\vartheta)$ are unknown as well. At the same time, the components f_u^{gr}, f_v^{gr}, f_w^{gr} are considered to be active and given.

The relations brought above make it possible to formulate a set of equations for elastic bending of the DS in a bore-hole with a specified centerline (1). It is finally written as the third order differential equation system:

$$\begin{aligned}
\frac{dh_1}{d\vartheta} &= h_2, \\
\frac{dh_2}{d\vartheta} &= \frac{dD}{Dd\vartheta}h_2 - D\frac{dk_T}{d\vartheta} - \frac{D^2}{C}m_w^{fr}, \\
\frac{dF_w}{d\vartheta} &= D\cdot k_R \cosh_1 \cdot F_u - D\cdot k_R \sinh_1 \cdot F_v - D\cdot f_w^{gr} - D\cdot f_w^{fr}
\end{aligned} \tag{18}$$

together with equalities:

$$F_u = (C - A) k_R k_T \sin \mathrm{h}_1 + C k_R \frac{h_2}{D} \sin \mathrm{h}_1 - \frac{A}{D} \frac{dk_R}{d\vartheta} \cos \mathrm{h}_1,$$

$$F_v = (C - A) k_R k_T \cos \mathrm{h}_1 + C k_R \frac{h_2}{D} \cos \mathrm{h}_1 + \frac{A}{D} \frac{dk_R}{d\vartheta} \sin \mathrm{h}_1 \qquad (19)$$

following from Eqs. (17).

Using the equations derived above, one can determine the external and internal force factors initiated in movement of the DS inside a bore-hole with an arbitrary trajectory of axial line. These trajectories can also include any geometrical imperfections, which yet are described by Eq. (1) and are differentiable.

There is a commonly encountered problem in drilling curvilinear boreholes: due to a sudden loss of homogeneity of tectonic structure or violation of the drilling technique, the well trajectories deviates from the designed one and some local geometrical imperfections arise on it. The trajectory perturbations appear usually in the shapes of a three-dimensional spiral, plane harmonic wave or a local smoothed break. This work addresses the break imperfection case. The designed bore-hole centerline is assumed to be represented by a quarter arc of an ellipse with semi axes H and L in the plane xOz:

$$x = L \cos \vartheta, \qquad y = 0, \qquad z = H \sin \vartheta \qquad (3\pi / 2 \le \vartheta \le 2\pi). \qquad (20)$$

For this geometry we solve the above-stated problem of determination of internal and external force factors that act on a DS during its motion. Then, the bore-hole centerline geometry is specified to have ~~a~~ distortions in the shape of breaks (Fig. 1).

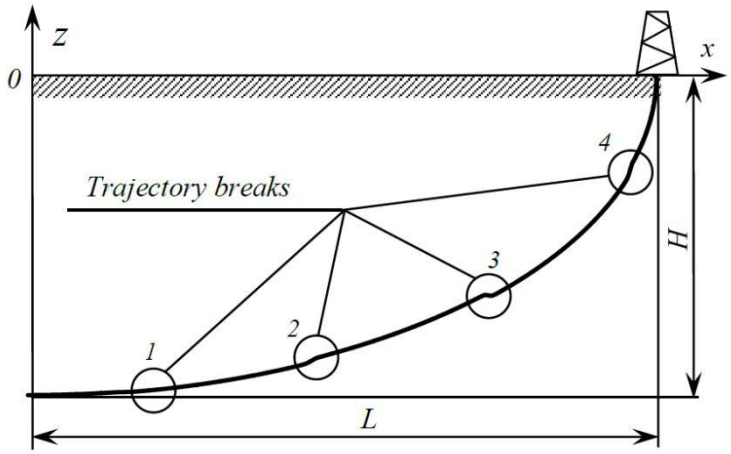


Figure 1 – The bore-hole trajectory with planar imperfections
Рисунок 1 – Траєкторія свердловини з планарними недосконалостями

They can be approximated by superimposing apexes of hyperbolas with different sharp nesses (eccentricities) and angles between their asymptotes:

$$z_1 = -\left\{ \frac{\mathrm{tg}\,\alpha (x - x_1)}{2} + \sqrt{\left[\frac{\mathrm{tg}\,\alpha (x - x_1)}{2} \right]^2 - \varepsilon} \right\}, \qquad (21)$$

$$z_2 = \left\{ \frac{\mathrm{tg}\,\alpha (x - x_2)}{2} + \sqrt{\left[\frac{\mathrm{tg}\,\alpha (x - x_2)}{2} \right]^2 - \varepsilon} \right\}. \qquad (22)$$

Here α is the angle between the hyperbola asymptotes, x_i is the x coordinate of the hyperbola center, and ε is the parameter characterizing the hyperbola eccentricity.

If the asymptotes of the left branches of two similar hyperbolas with different signs are oriented along the negative direction of the Ox axis, then their superposition with small shift $\Delta s = x_2 - x_1$ in plane xOz approximately produces a broken rectilinear line with small shift Δs and curvature radii R at the break apexes. If one imposes this line on the initial trajectory as given in Eq. (20), then the ultimate trajectory of the drill string will attain the configuration shown in Fig. 1.

The breaks can be located also out of the xOz plane, then their expressions are as follows:

$$y_{1,2} = \pm\left\{\frac{\mathrm{tg}\,\alpha\left(x - x_{1,2}\right)}{2} + \sqrt{\left[\frac{\mathrm{tg}\,\alpha\left(x - x_{1,2}\right)}{2}\right]^2 - \varepsilon}\right\}. \quad (23)$$

In the general case, the planar and three-dimensional imperfections can be located at several places and have different radii R and angles α. As such, they should be simulated by superposition of different breaks as given in Eqs. (21), (22) or (23) on the design trajectory of Eq. (20).

Integration of system (18), (19) with appropriate initial conditions at $s = 0$ is performed by the Runge-Kutta method.

Results of the research conducted. As noted above, the process of a bore-hole driving includes three major procedures distinguished by technological methods and calculation schemes. The procedure of drilling involves combination of downward axial movement of the drill string with its rotation and is accompanied by action of cutting moment $M_w(0)$ (torque on bit) and reaction $F_w(0)$ (force on bit), as well as inertia force $\mathbf{f}^l(s)$ of the moving liquid. For this procedure all forces (11) must be allowed for and force f_w^{fr} should be taken with the "+" sign.

The procedure of the DS lowering is characterized by absence of the moment $M_w(0)$ and forces $F_w(0)$, $\mathbf{f}^l(s)$, whereas force f_w^{fr} retains its sign "+".

The procedure of the DS raising differs from the previous one only by the "–" sign before the f_w^{fr} expression.

These procedures were computer simulated under different values of characteristic parameters, namely: $d_e = 0{,}1683m$, $d_i = 0{,}1583m$, $L = 8000m$ and $12000m$, $H = 4000m$, $E = 2{,}1\cdot 10^{11} Pa$, $G = 0.8077\cdot 10^{11} Pa$, $\gamma_{st} = 7850kg/m^3$, $\gamma_l = 1500kg/m^3$, $\nu = 0{,}1$ and 100 , $F_w(0) = -5\cdot 10^4 N$, $M_w(0) = 10^5 Nm$.

Depending upon formations, typical friction factor used in technological operation simulations ranges from $0{,}22$ in oil base mud to $0{,}35$ in water base mud. In this analysis, the value $\mu = 0{,}2$ was used.

Four geometrical breaks were imposed on the axis line of the bore-hole. Magnitudes of their curvatures were specified in such a way (Fig. 2) as to permit the comparison of their influence on the resistance to the drill string movement.

Firstly, the case $L = 8000m$, $\mu = 0,2$, $\nu = 100$, $V = 0$ was considered. The calculation results are listed in Table 1.

Table 1 – Stress-strain parameters of the drill string bending ($L = 8000m$, $\mu = 0,2$, $\nu = 100$)

Таблиця 1 – Параметри напружено-деформованого стану вигину бурильної колони ($L = 8000м$, $\mu = 0,2$, $\nu = 100$)

Type of operation	Task number	Type of imperfection	$F_w(S), MN$	ΔS, m	$M_w(S)$, Nm	$\varphi(S)$, rad
Drilling	1	None	0,682	0,26	$10,042 \cdot 10^4$	384,2
	2	Planar	0,662	0,21	$10,046 \cdot 10^4$	387,5
	3	3D	0,588	0,09	$10,051 \cdot 10^4$	386,2
Lowering	4	None	0,739	0,77	$0,042 \cdot 10^4$	0,90
	5	Planar	0,716	0,74	$0,045 \cdot 10^4$	0,94
	6	3D	0,636	0,62	$0,051 \cdot 10^4$	0,97
Raising	7	None	1.765	5,74	$0,044 \cdot 10^4$	0,82
	8	Planar	2,210	6,95	$0,080 \cdot 10^4$	1,22
	9	3D	2,525	7,19	$0,108 \cdot 10^4$	1,31

It can be seen that only the break with curvature radius $R \approx 50m$ exerts tangible effect on the functions $F_w(s)$ and $M_w(s)$, whereas three other imperfections do not practically influence on their values.

The resultant bending moment $M_R(s) = \sqrt{M_u^2 + M_v^2}$ depends solely upon the curvature k_R. So, its diagram is similar to the k_R graph (Fig. 2).

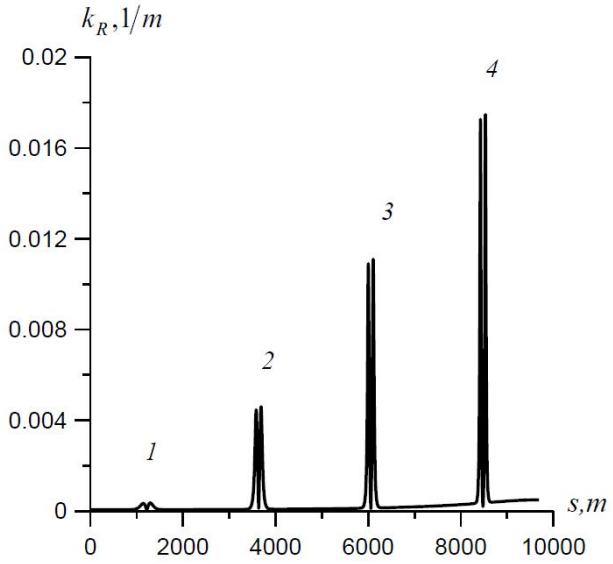


Figure 2 – Diagram of the curvature change

Рисунок 2 – Діаграма зміни кривизни

The friction functions f_w^{fr}, m_w^{fr} also have nearly discontinuous character and rise steeply at the imperfection zones.

The operation of the DS lowering does not qualitatively differ from the drilling, though the values of the $F_w(s)$ and $M_w(s)$ functions assume lesser magnitudes. But the imperfection presence is more conspicuous in the raising operation.

In order to gain more exhaustive insight into the DS stress-strain state, the total elastic elongation of the DS tube:

$$\Delta S = \frac{1}{EF}\int_0^S F_w(s)ds$$

and the angle $\varphi(S)$ of the elastic twist of the DS at the end $s = S$:

$$\varphi(S) = \frac{1}{GI_w}\int_0^S M_w(s)ds$$

are included into the Table data.

Table 2 – Stress-strain parameters of the drill string bending ($L = 8000m$, $\mu = 0,2$, $\nu = 0,1$)

Таблиця 2 – Параметри напружено-деформованого стану вигину бурильної колони ($L = 8000м$, $\mu = 0,2$, $\nu = 0,1$)

Type of operation	Task number	Type of imperfection	$F_w(S)$, MN	ΔS, m	$M_w(S)$, Nm	$\varphi(S)$, rad
Drilling	1	None	1,138	2,66	$14,189\cdot10^4$	469,9
	2	Planar	1,141	2,69	$15,379\cdot10^4$	486,1
	3	3D	1,111	2,64	$16,499\cdot10^4$	488,9
Lowering	4	None	1,190	3,13	$4,177\cdot10^4$	85,5
	5	Planar	1,190	3,16	$5,524\cdot10^4$	100,7
	6	3D	1,159	3,11	$6,720\cdot10^4$	105,3
Raising	7	None	1,289	3,62	$4,202\cdot10^4$	84,7
	8	Planar	1,325	3,74	$5,855\cdot10^4$	103,4
	9	3D	1,325	3,72	$7,256\cdot10^4$	108,8

Then, for comparative purposes, the ν parameter was reduced to the value $\nu = 0,1$. It can be seen, that with increase of the DS rotation velocity the internal and external forces exhibit redistribution. Thus, if the DS rotation is slow (Table 1), then the friction forces impede the DS raising but make easier its lowering and the drilling process, while enlargement of the rotation velocity (Table 2) leads to decrease of the axial friction force.

With enlargement of the angular velocity ω, the friction force f_w^{fr}, impeding axial motion of the DS, as well drops and its influence on the system functioning decreases. In this connection, the problem about determination of the axial force $\mathbf{F}(S)$ for a flexible thread inside absolutely smooth cavity with arbitrary prescribed geometry $z = f(x)$ (Fig. 3) is of practical interest.

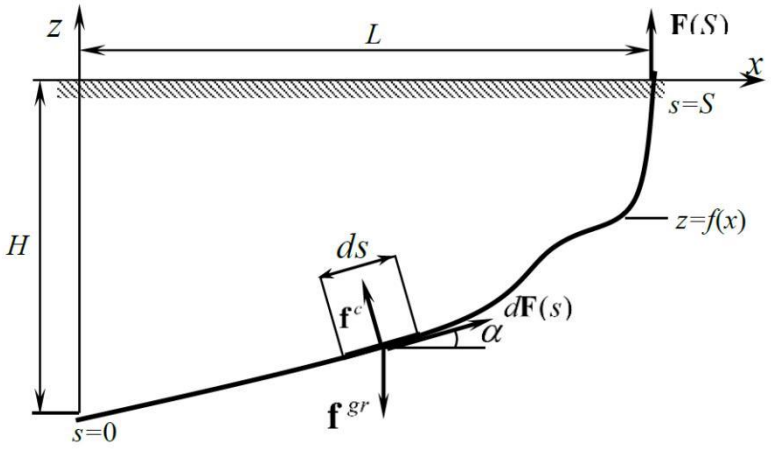


Figure 3 – Equilibrium of a flexible thread in a curvilinear hole
Рисунок 3 – Рівновага гнучкої нитки у криволінійній свердловині

Separate conditionally the thread element of length ds. It is acted upon by the gravity force $\mathbf{f}^{gr} ds$, contact force $\mathbf{f}^{c} ds$ and the force $\mathbf{F}(s)$ increment $d\mathbf{F}$. Project all the forces on the axis tangent to the curve $z = f(x)$:

$$dF - f^{gr} \cdot \sin\alpha \cdot ds = 0 .$$

Then

$$\frac{dF}{ds} = g\gamma \sin\alpha . \tag{24}$$

Here γ is the mass of the thread unit length, α is the angle of the tangent inclination. It is pertinent to note that Eq. (24) follows also from the third equation of system (9). Use the formula:

$$\sin\alpha = \sqrt{\mathrm{tg}^2\alpha / \left(1 + \mathrm{tg}^2\alpha\right)} = \sqrt{\left(dz/dx\right)^2 / \left[1 + \left(dz/dx\right)^2\right]} .$$

Take into account that:

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dz)^2} = \sqrt{1 + (dz/dx)^2}\, dx .$$

In this case it issues from Eq.(24):

$$F(S) = g\gamma \int_0^L \sqrt{(dz/dx)^2 / [1 + (dz/dx)^2]} \cdot \sqrt{1 + (dz/dx)^2} \cdot dx =$$

$$= g\gamma \int_0^L (dz/dx) dx = g\gamma \int_0^H dz = g\gamma H.$$

What this means is that, if to ignore bending stiffness of the DS, then in a smooth curvilinear bore-hole with any geometrical outline the axial force acting on the DS at the suspension point is equal to the gravity force acting on the vertical DS of length H. In our case:

$$F(S) = g(\gamma_{st} - \gamma_l)H = 1,239 MN.$$

Further features of the long bore-hole drilling are essential enlargement of the $M_w(0)$ torque, as well as elastic elongation ΔS and twist angle $\varphi(S)$.

Conclusions. The study involved mathematical modeling of the stress-strain state of a drill string under conditions of a curvilinear wellbore trajectory with potential geometric deviations. The analysis provided a quantitative assessment of key parameters characterizing the mechanical interaction between the pipe and the borehole wall.

1. Impact of trajectory imperfections on friction force and loads: It was established that even small geometric imperfections in the borehole, especially those with a small radius of curvature (e.g., R=100 m), significantly increase the internal and external forces acting on the drill string. This is evidenced by the data in Tables 1 and 2, which compare values of axial forces, elastic elongation, total friction moment and twist angle for various scenarios.

2. Increased load during raising: The most notable increase in loads is observed during the drill string raising (tripping out) operation. For instance, for a 3D imperfection without rotation (Table 1, task 9), the axial force increases to 2,525 *MN* compared to 0,682 *MN* during drilling without imperfections (Table 1, task 1). This indicates that the tripping out operation is the most critical in terms of the risk of sticking or damage to the drill string.

3. Influence of rotation speed: Increasing the drill string's rotation speed leads to a redistribution of internal and external forces. Specifically, with an increase in angular velocity, the axial friction force impeding axial movement decreases, which can facilitate the drilling and lowering processes, but at the same time, it can increase the total friction moment.

4. Elastic elongation and twist: The study shows that the elastic elongation of the drill string and the angle of elastic twist significantly increase in the presence of imperfections and during the tripping out operation. For example, for a 3D imperfection during tripping out (Table 1, task 9), ΔS reaches 7,19 m and $\varphi(S)$ reaches 1,31 rad, which are significantly higher than during drilling without imperfections. These parameters are critical for assessing string integrity and the risk of failure.

The research emphasizes the critical need for developing accurate mathematical models to predict and manage drill string behavior in complex curvilinear boreholes. Existing methods for theoretical simulation of mechanical effects accompanying drilling are insufficiently advanced, making this work particularly relevant.

The developed mathematical model allows for the identification of potential sticking zones for the drill string (so-called "frictional lock-up") through a detailed analysis of contact and frictional interactions. This provides an opportunity to develop preventive measures to avoid emergency situations.

The model can be used to select the most effective drilling, lowering, and raising regimes for the drill string, considering specific geological conditions and borehole geometry. This contributes to increased hydrocarbon extraction efficiency and reduced operating costs.

The authors successfully integrated various factors influencing the stress-strain state of the drill string, including gravity, contact and frictional forces, inertial forces of the fluid, and torque. Such a comprehensive approach ensures more realistic modeling and more accurate predictions.

The study for the first time models the impact of geometric imperfections in the borehole trajectory (breaks approximated by hyperbolas) on drill string dynamics. This is a significant step forward, as such imperfections frequently occur in practice and can lead to serious complications.

The research results have direct practical applications for drilling engineers, enabling them to make informed decisions regarding equipment selection, drilling parameters, and accident prevention strategies. This directly impacts energy security and economic stability.

Conducted research makes a significant contribution to the development of mathematical modeling methods for drilling processes, providing tools to enhance the safety and efficiency of hydrocarbon extraction from deep curvilinear boreholes.

Future research should focus on expanding the mathematical model by incorporating dynamic processes such as drill string vibrations and the effects of variable rock properties and drilling fluid behavior. Special attention should be given to the development of real-time adaptive control of drilling parameters based on simulation results and sensor monitoring data. This approach will enhance the accuracy of predicting emergency situations and support the development of effective drilling management strategies under complex geological conditions.

References

1. Kang, Z., Qin, H., Zhang, Y., Hao, X., Chen, G. & Hou, B. (2023). Coil optimization of ultra-deep azimuthal electromagnetic resistivity logging while drilling tool based on numerical simulation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, (13), 787–801. DOI: 10.1007/s13202-022-01575-1.

2. Xu, Y., Wang, L., Chen, X. & Fan, Y. (2022). Improvement of drilling quality using precision directional drilling technology. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, (12), 1239–1250. DOI: 10.1007/s13202-022-01510-4.

3. Leśniak, G., Brunner, D.J. & Topór, T. (2022). Application of long-reach directional drilling boreholes for gas drainage of adjacent seams in coal mines with severe geological conditions. *International Journal of Coal Science & Technology*, (9). DOI: 10.1007/s40789-022-00553-6.

4. Liu, C., Zhang, D. & Zhao, H. (2022). Experimental study on hydraulic fracturing properties of elliptical boreholes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (81). DOI: 10.1007/s10064-021-02531-9.

5. Zhou, J., Zhang, Y., Liu, H., Zhang, X. & Lin, X. (2021). Analysis of drillstring buckling in complex wellbores considering the effect of wellbore curvature. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (196). DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107680.

6. Cunha, Jr A., Soize, C. & Sampaio, R. (2021). Computational modeling of the nonlinear stochastic dynamics of horizontal drillstrings *arXiv preprint.* URL: https://arxiv.org/abs/2105.13454.

7. Liu, F., Li, Q. & Fang J. (2024). Key technology and practice of deep borehole pneumatic directional drilling in broken-soft coal seam in Yangquan mining area. *Coal Geology & Exploration*, (52), DOI: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0226.

8. Chudyk, I., Grydzhuk, Ja., Velychkovych, A. & Andrusyak, A. (2019). Analytical evaluation of inercial properties ofthe range of the drill string in its rotation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, (7(97))*, 6-14.

9. Levkivska, L. V. & Gorbunovich, I.V. (2020). Komp'yuterne vyznachennya zony prykhvatu burylnoyi kolony u kryvoliniyniy sverdlovyni [Computerized determination of the stuck zone of a drill string

in a curvature well]. *Tekhnolohiyi, instrumenty ta stratehiyi realizatsiyi naukovykh doslidzhen: materialy mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi (T. 1), 10 kvitnya, Lutsk – Technologies, tools and strategies for implementing scientific research: proceedings of the international scientific conference (Vol. 1), April 10, Lutsk,* 91-93. [in Ukrainian].

10. Levkivska, L. V. & Gorbunovich, I.V. (2020). Doslidzhennya obertovoho y pozdovzhnoho rukhiv naddovhoho stryzhnya v pokhylykh porozhnynakh [Investigation of rotational and longitudinal motions of a super long rod in inclined bore-holes]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriya "Tekhnichni nauky" – Bulletin of the National Transport University. "Technical Sciences", 1 (46),* 92-102 [in Ukrainian].

11. Haydaychuk, V. V., Lazareva, M.V. & Levkivska, L. V. (2023). Prohnozuvannya zakrytychnoyi povedinky burylnykh kolon u horyzontalnykh sverdlovynakh [Forecasting supercritical behavior of drill strings in horizontal wells]. Opir materialiv i teoriya sporud – Strength of Materials and Theory of Structures, 110, 118-130 [in Ukrainian].

12. Levkivska, L. V. (2024). Pruzhne zakrytychne zhynannya burylnykh kolon u tsylindrychnykh porozhnynakh nafto-hazovykh sverdlovyn [Elastic supercritical bending of drill strings in cylindrical cavities of oil and gas wells*]. Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriya "Tekhnichni nauky" – Bulletin of the National Transport University. "Technical Sciences", 1 (59),* 104-114 [in Ukrainian]. DOI: 10.33744/2308-6645-2024-1-58-104-114.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ БУРІННЯ ГЛИБОКИХ КРИВОЛІНІЙНИХ СВЕРДЛОВИН

Левківська Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, кафедра вищої математики, к. 514, вул. Бойчука 42, Київ, Україна, 01103, e-mail: l.v.g.ntu@gmail.com, тел. +380505114407, ідентифікатор orcid.org/0000-0002-5589-5257.

Горбунович Ірина Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, кафедра вищої математики, к. 514, вул. Бойчука 42, Київ, Україна, 01103, e-mail: irina.gorbunovich@gmail.com, тел. +380676001177, ідентифікатор orcid.org/0000-0002-6859-0663.

Анотація: У цій статті розглядається процес деформування бурильної колони, під час якого вона вигинається, торкаючись стінок нафто-газової свердловини, і продовжує змінювати свою форму під впливом зростаючої поздовжньої сили, розподіленого контактного навантаження та крутного моменту.

Мета роботи – побудувати нелінійні диференціальні рівняння, що описують контактну взаємодію труби бурильної колони зі стінкою свердловини, запропонувати методику їх чисельного розв'язання та представити результати комп'ютерного моделювання.

Методи дослідження – теоретичні та експериментальні.

Розроблено математичну модель для опису механічних взаємодій бурильної колони зі стовбуром свердловини під час буріння, опускання та піднімання. Модель базується на теорії криволінійних гнучких стержнів і враховує внутрішні та зовнішні силові фактори, зокрема сили контакту та тертя, гравітацію та впливи промивної рідини. Система нелінійних диференціальних рівнянь сформульована для опису стану напружень та деформацій бурильної колони з урахуванням геометричних дефектів траєкторії свердловини. Обчислювальні моделювання аналізують вплив різних параметрів кривини свердловини на поведінку бурильної колони, визначаючи суттєві впливи на згинальні моменти, сили тертя та потенційні ділянки прихоплення бурильної колони.

Практичне застосування отриманих результатів полягає у вдосконаленні методів прогнозування аварійних ситуацій, пов'язаних із заклинюванням бурильної колони, та розробці рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів буріння.

Отримані результати дозволяють оцінити можливість виникнення аварійних ситуацій і оптимізувати режими буріння для підвищення ефективності процесу, мінімізувати зношення обладнання та зменшити ризики виникнення аварій під час освоєння нафтових і газових родовищ.

Ключові слова: криволінійне буріння, свердловина, геометричні недосконалості, внутрішні і зовнішні сили, прямі та обернені задачі.

Перелік посилань

1. Kang, Z., Qin, H., Zhang, Y., Hao, X., Chen, G. & Hou, B. (2023). Coil optimization of ultra-deep azimuthal electromagnetic resistivity logging while drilling tool based on numerical simulation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, (13), 787–801. DOI: 10.1007/s13202-022-01575-1.

2. Xu, Y., Wang, L., Chen, X. & Fan, Y. (2022). Improvement of drilling quality using precision directional drilling technology. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, (12), 1239–1250. DOI: 10.1007/s13202-022-01510-4.

3. Leśniak, G., Brunner, D.J. & Topór, T. (2022). Application of long-reach directional drilling boreholes for gas drainage of adjacent seams in coal mines with severe geological conditions. *International Journal of Coal Science & Technology*, (9). DOI: 10.1007/s40789-022-00553-6.

4. Liu, C., Zhang, D. & Zhao, H. (2022). Experimental study on hydraulic fracturing properties of elliptical boreholes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (81). DOI: 10.1007/s10064-021-02531-9.

5. Zhou, J., Zhang, Y., Liu, H., Zhang, X. & Lin, X. (2021). Analysis of drillstring buckling in complex wellbores considering the effect of wellbore curvature. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (196). DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107680.

6. Cunha, Jr A., Soize, C. & Sampaio, R. (2021). Computational modeling of the nonlinear stochastic dynamics of horizontal drillstrings *arXiv preprint.* URL: https://arxiv.org/abs/2105.13454.

7. Liu, F., Li, Q. & Fang J. (2024). Key technology and practice of deep borehole pneumatic directional drilling in broken-soft coal seam in Yangquan mining area. *Coal Geology & Exploration*, (52), DOI: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0226.

8. Chudyk, I., Grydzhuk, Ja., Velychkovych, A. & Andrusyak, A. (2019). Analytical evaluation of inercial properties ofthe range of the drill string in its rotation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, (7(97))*, 6-14.

9. Левківська Л.В. Комп'ютерне визначення зони прихвату бурильної колони у криволінійній свердловині / Л. В. Левківська, І.В. Горбунович // Технології, інструменти та стратегії реалізації наукових досліджень: матеріали міжнародної наукової конференції (Т.1), 10 квітня 2020 р, Луцьк, Україна: МЦНД. – С. 91-93.

10. Левківська Л.В. Дослідження обертового й поздовжнього рухів наддовгого стрижня в похилих порожнинах / Л. В. Левківська, І.В. Горбунович // Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки". Науково-технічний збірник. Випуск 1 (46), 2020. – С. 92-102.

11. Гайдайчук В. В. Прогнозування закритичної поведінки бурильних колон у горизонтальних свердловинах / В.В. Гайдайчук, М.В. Лазарева, Л. В. Левківська / Опір матеріалів і теорія споруд // Strength of Materials and Theory of Structures. 2023. № 110. – С. 118-130.

12. Левківська Л.В. Пружне закритичне згинання бурильних колон у циліндричних порожнинах нафто-газових свердловин / Л. В. Левківська // Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки". Науковий журнал. Випуск 1 (59), 2024. – С. 104-114.

УДК 624.21
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-063-079

BIM-ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЄКТНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ В МОСТОБУДУВАННІ УКРАЇНИ: АНАЛІЗ ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ

BIM TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR AUTOMATING PROJECT DOCUMENTATION IN BRIDGE ENGINEERING IN UKRAINE: ANALYSIS OF PRACTICAL EXPERIENCE



Медведєв Костянтин Володимирович, *кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри мостів, тунелі та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: kvmedvediev@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-0704-7093



Новіков Михайло Михайлович, *аспірант кафедри мостів, тунелі та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна. спеціаліст, BIM-менеджер ТОВ «Валбек», Київ, Україна,*
e-mail: nov.mih.mih@gmail.com

https://orcid.org/0009-0008-6459-3745



Гальченко Олексій Михайлович*, магістр, головний інженер проєктів ТОВ «Валбек», Київ, Україна,*
e-mail: galchenko1989@gmail.com

https://orcid.org/0009-0000-4002-1082



Дударенко Олександр Вікторович*, магістр, директор ТОВ «Валбек», Київ, Україна,*
e-mail: alexandr.dudarenko@gmail.com

https://orcid.org/0009-0004-9726-2839



Корецький Андрій Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,*
e-mail: andriy.koretskyi@ntu.edu.ua

https://orcid.org/0000-0003-0307-0306

Анотація. Стаття присвячена аналізу використання BIM-інструментів для автоматизації створення специфікацій та креслень у проєктах мостів в Україні. На основі практичного досвіду проєктування чотирьох мостових споруд досліджено можливості застосування середовища Autodesk

Revit у поєднанні з модулем візуального програмування Dynamo, параметричними родинами та підготовленими шаблонами для оптимізації процесу підготовки проєктної документації. Окрему увагу приділено порівнянню з традиційними методами (з використанням програм AutoCAD, Excel), яке виконувалося на основі моделювання та оформлення креслень берегової опори. Результати використання середовища Autodesk Revit та програмування в Dynamo продемонстрували суттєве скорочення часу підготовки креслень і специфікацій та зменшення кількості помилок.

Крім того у статті розглянуто ключові напрями автоматизації: створення специфікацій матеріалів і виробів, використання уніфікованих шаблонів для оформлення креслень, визначення координат конструктивних елементів, а також організацію структури моделі, що дало змогу повторно застосовувати як цифрові моделі, так і готові креслення для економії часу. Отримані результати підтверджують, що застосування BIM-технологій допомагає підвищити точність проєктної документації, досягти більшої узгодженості даних та гнучкості у разі внесення змін.

Водночас виявлено низку викликів та ризиків: значні витрати часу на початкове налаштування шаблонів і бібліотек, функціональні обмеження Revit у роботі зі складними криволінійними конструкціями, труднощі дотримання вимог державних стандартів до оформлення документації та необхідність підготовки персоналу до роботи з шаблонами. Попри ці бар'єри, досвід реалізації кількох проєктів показав, що з накопиченням напрацювань економічна ефективність BIM-автоматизації зростає завдяки повторному використанню готових рішень.

За результатами дослідження запропоновано перспективні напрями розвитку BIM у мостобудуванні України: створення галузевих стандартів та адаптацію нормативної бази до вимог BIM-технологій, розробку алгоритмів і скриптів для моделювання складних криволінійних конструкцій, інтеграцію Revit з іншими інженерними платформами, а також розвиток освітніх програм і поширення практичного досвіду серед інженерів. Отримані результати можуть стати основою для подальшої стандартизації та цифрової трансформації будівельної галузі.

Ключові слова: проєктування мостів, цифрова модель, інформаційне моделювання, BIM, Revit, Dynamo, мостові конструкції, оформлення проєктної документації, параметричне моделювання.

Вступ. Інформаційне моделювання споруд (BIM) дедалі активніше впроваджується в інфраструктурні проєкти, зокрема у мостобудуванні, завдяки здатності забезпечити узгоджене планування, проєктування, візуалізацію, аналіз і управління даними протягом життєвого циклу споруди. Одним із важливих напрямів розвитку BIM-технологій є автоматизація підготовки проєктної та робочої документації — специфікацій, креслень, таблиць обсягу об'ємів робіт тощо. Це особливо важливо у проєктуванні мостових конструкцій, де складна геометрія елементів, взаємодія з навколишнім середовищем та інженерними комунікаціями потребує максимальної точності й наочності.

В українському контексті значущість застосування BIM-технологій зростає через обмежені ресурси проєктних організацій, підвищений попит на будівництво мостів у межах програми відновлення інфраструктури, а також поступовий перехід державних замовників до цифрових форматів подання проєктної документації [1,2].

Водночас упровадження BIM-технологій у українському мостобудуванні стикається з низкою викликів, зокрема: нестачею кваліфікованих фахівців, обмеженими можливостями профільного програмного забезпечення (яке здебільшого призначене для проєктування будівель або автомобільних доріг), а також невідповідністю чинних стандартів документації, що переважно ґрунтуються на традиційних підходах до проєктування.

У світі вже активно формуються практики застосування програмних рішень для автоматизації проєктування та підготовки документації, зокрема в середовищах Revit, Tekla Structures, Allplan із використанням візуального програмування (Dynamo, Grasshopper), скриптів і плагінів [3-8]. В Україні ці підходи лише починають розвиватися й здебільшого реалізуються інженерами на локальному рівні — без належної координації, стандартизації та обміну досвідом. Наразі бракує ґрунтовних досліджень, що комплексно аналізують українські практики BIM-автоматизації саме у сфері мостобудування.

Таким чином, постає потреба у системному аналізі наявних рішень, викликів і потенціалу застосування BIM-інструментів у проєктах мостів в Україні. Такий аналіз дозволить не лише узагальнити наявний досвід, а й окреслити перспективні напрями розвитку та стандартизації відповідних підходів.

Метою цієї статті є дослідження можливостей автоматизації проєктування мостових конструкцій за допомогою BIM-інструментів. У межах дослідження оцінено ефективність існуючих підходів, виявлено основні бар'єри впровадження та запропоновано рекомендації щодо їх подальшого розвитку та стандартизації.

1 Виклад основного матеріалу.

1.1 Опис об'єктів дослідження У межах дослідження було проаналізовано чотири мостових об'єкти. Інженерна робота на цих об'єктах полягала у розробці проєктної документації на будівництво нових споруд на заміну існуючих, які були зруйновані внаслідок бойових дій. В процесі розробки проєктної документації впроваджувалася автоматизація підготовки, перевірки та публікації робочої документації із використанням технологій інформаційного моделювання в середовищі Autodesk Revit у вз'язці з іншими програмами такими як Autodesk Construction Cloud, MS Office, Midas Civil, Idea Statica та інші.

Об'єкти розташовувалися в різних регіонах України, проте мали подібні конструктивні рішення, що дозволило всебічно оцінити підходи до виконання інженерних задач. Крім того, ці проєкти характеризувалися спільною методологією впровадження BIM-автоматизації, організацією колективної роботи та доступу до моделей, а також єдиним підходом до перевірки й виявлення колізій. У кожному випадку створювалася повноцінна цифрова модель конструкцій мосту, яка слугувала основою для автоматизованого формування розрахунків, специфікацій та креслень.

Перші три об'єкти — конструктивно тотожні мости через водні перешкоди зі збірно-монолітною прогоновою будовою та опорами. Прогонова будова складалася зі збірних залізобетонних попередньо напружених П-подібних балок заводського виготовлення, об'єднаних монолітною плитою проїзної частини. Балки та плита утворювали температурно нерозрізну прогонову будову з довжинами прогонів від 12 до 18 м. Загальна довжина споруд коливалася від 36,86 до 48,86 м. Опори на всіх трьох об'єктах складалися з фундаментів на забивних палях різної довжини, об'єднаних високим монолітним ростверком, на який через підферменні тумби спиралися прогонові будови. Невелика різниця між довжинами прогонів та загальною довжиною мостів дозволила всебічно оцінити та опанувати методи впровадження BIM-технологій у проєктуванні мостів На рисунках 1 та 2 наведено модель загального вигляду мосту та поперечний переріз моста з П-подібних балок.

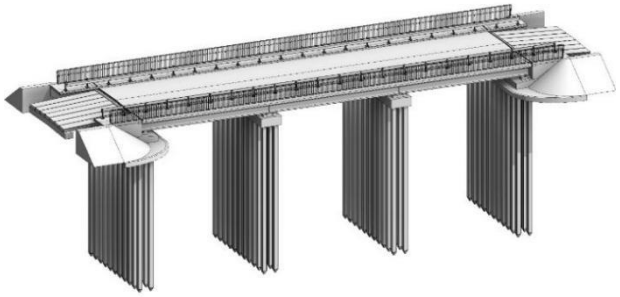


Рисунок 1 – Загальний вигляд моделі мосту з опорами у вигляді високих ростверків

Figure 1 – General view of bridge model with high grillages piers



Рисунок 2 – Характерний переріз мостового полотна та прогонової будови з П-подібних балок

Figure 2 – Typical cross-section of bridge deck and span structure made of П-shaped beams

Четвертий об’єкт — Міст через річку Інгулець із збірно-монолітною прогоновою будовою з попередньо напружених І-подібних балок та монолітними опорами. Прогонова будова складалась з балок заводського виготовлення завдовжки 36 м, об’єднаних монолітною плитою проїзної частини. Схема мосту температурно-нерозрізна з довжиною температурної пліті 108,5 м, повна довжина споруд при цьому склала 109,1 м. Конструкція опор складалась із фундаментів на буронабивних палях діаметром 1,5 м та довжиною до 25 м, об’єднаних монолітним ростверком. На ростверках влаштовувалось монолітне тіло опори та ригель, на який, через підферменні тумби, спирались прогонові будови. На рисунку 3 наведено загальний вигляд моделі мосту з прогонами 36 м, на рисунку 4 поперечний переріз мосту з прогоновою будовою з І-подібних балок.

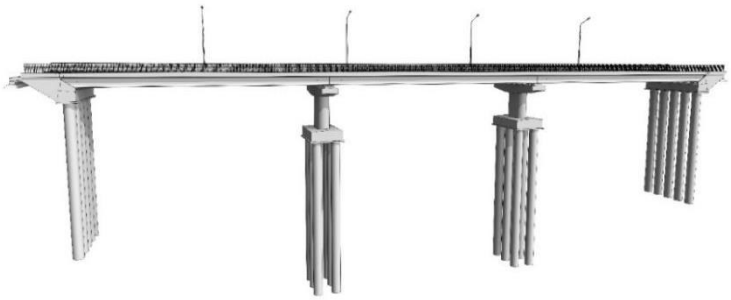


Рисунок 3 – Загальний вигляд моделі мосту з прогонами по 36 м

Figure 3 – General view of bridge model with 36 m spans

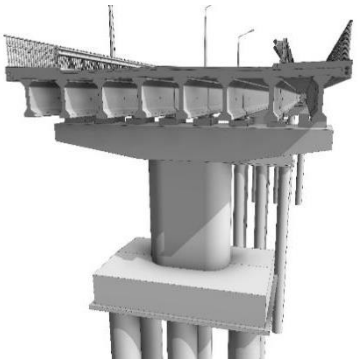


Рисунок 4 – Характерний переріз мостового полотна та прогонової будови з І-подібних балок

Figure 4 – Typical cross-section of bridge deck and span structure made of I-shaped beams

У всіх чотирьох розглянутих проєктах BIM-автоматизація охоплювала стадію розробки робочої документації (РД) відповідно до чинних вимог українського законодавства та внутрішніх стандартів проєктної організації.

В окремих випадках елементи BIM-моделі продовжували використовуватись і на етапі будівництва — зокрема, тривимірні моделі арматурних каркасів застосовувались для кращого розуміння конструктивних рішень.

1.2 Мета автоматизації в контексті Revit

Основною метою впровадження автоматизації в проєктах було підвищення ефективності підготовки робочої документації на стадії РД. У середовищі Revit було автоматизовано ключові процеси, що раніше потребували значних часових витрат і великої кількості ручних операцій. Зокрема, автоматизація охоплювала створення специфікацій матеріалів і виробів, оформлення креслень відповідно до чинних нормативних вимог, визначення координат елементів конструкцій тощо.

Впровадження цих рішень мало забезпечити низку очікуваних переваг. По-перше, зменшення обсягу рутинної роботи завдяки використанню готових шаблонів. По-друге, прискорення циклів підготовки креслень і специфікацій, що особливо критично для проєктів із великим обсягом повторюваних елементів. По-третє, мінімізація людських помилок завдяки структурованому підходу до заповнення параметрів і стандартизації представлення даних [9,10]. Крім того, автоматизація мала створити передумови для повторного використання напрацьованих рішень і шаблонів у наступних проєктах, що підвищує загальну ефективність проєктування.

1.3 Підхід до реалізації автоматизації

Структура моделі

Одним із ключових недоліків використання BIM-технологій у середовищі Revit є обмежена можливість повторного використання креслень. Це зумовлено тим, що анотативні елементи (розміри, виноски тощо) прив'язані до тривимірних об'єктів моделі. Креслення формуються як проекція 3D-моделі на відповідні види, тому неможливо скопіювати лише анотації або лише геометрію без втрати зв'язків між ними.

Для подолання цього обмеження було реалізовано підхід розбиття моделі на окремі локальні файли для кожного конструктивного елемента, запропонований у роботах Alexis Girardet та Conrad Boton [3]. На рисунку 5 наведено ілюстрацію цього підходу до поділу цифрової моделі на локальні файли.

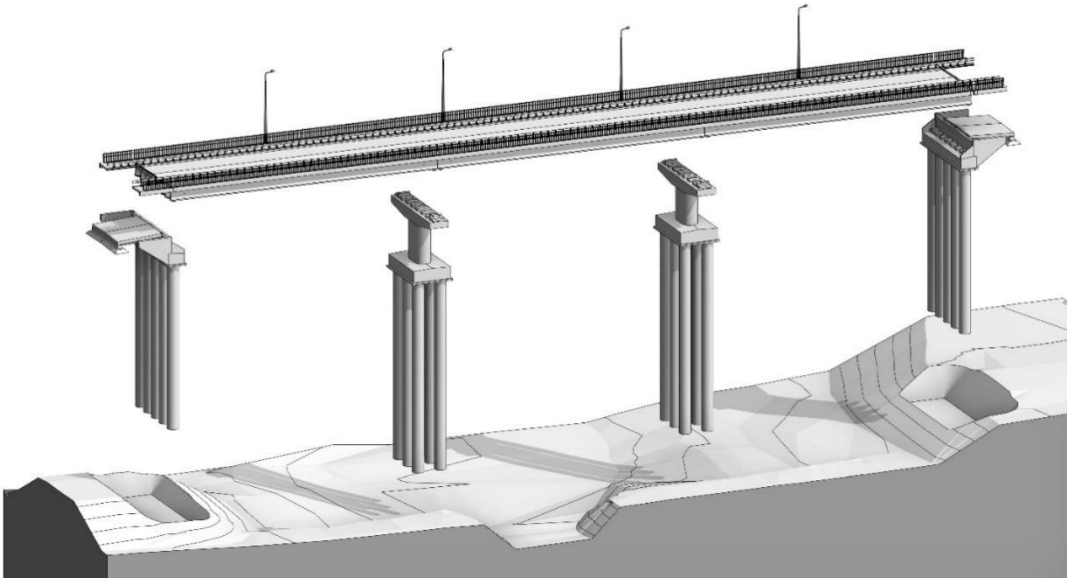


Рисунок 5 – Ілюстрація підходу до поділу цифрової моделі на локальні файли.

Figure 5 – Illustration of the approach for splitting a digital model into local files.

Ця методика дозволяє повторно використовувати вже оформлені креслення з мінімальними зусиллями. Алгоритм роботи передбачає наступне: після завершення моделювання одного елемента та оформлення його креслень файл зберігається під новою назвою, після чого в новому файлі змінюються глобальні координати, а геометрія оновлюється відповідно до нового елемента. Завдяки цьому значна частина анотативних елементів, видів і листів залишається актуальною та потребує лише мінімального коригування. Такий підхід ефективно використовує одну з основних переваг BIM — автоматичне оновлення документації при зміні моделі. Це значно скорочує час на оформлення креслень при повторюваних або схожих елементах конструкції.

Під час проєктування описаних мостів була реалізована наступна структура розбиття моделі:

- окремий файл для топографії,
- окремі моделі для берегової опори,
- проміжної опори,
- прогонової будови.

Специфікації

У процесі реалізації мостових проєктів було автоматизовано низку ключових процедур, що суттєво підвищило ефективність підготовки робочої документації в середовищі Revit. Насамперед це

стосувалося створення специфікацій — процесу, який у мостобудуванні потребує врахування широкого спектра типів елементів та методів їх обліку.

Типовий підхід у Revit передбачає формування специфікацій на основі базових параметрів елементів. Однак у мостових проєктах елементи відрізняються не лише геометрією, а й логікою обліку: частину елементів потрібно рахувати в штуках, частину — за об'ємом, інші — за площею (наприклад, покриття гідроізоляцією). Це унеможливлює використання універсальної специфікації без додаткової адаптації.

Для вирішення цієї проблеми була розроблена розширена система параметрів, яка включає як параметри елементів, так і параметри матеріалів. Було створено окремі формули для розрахунку різних типів даних: кількості, об'єму, площі, маси тощо. Наприклад, для збірного елемента у специфікації автоматично виводяться кількість і маса, а для монолітного — об'єм бетону. На рисунку 6 наведено схему алгоритму обчислення параметрів елемента залежно від його конструктивного типу та типу матеріалу.

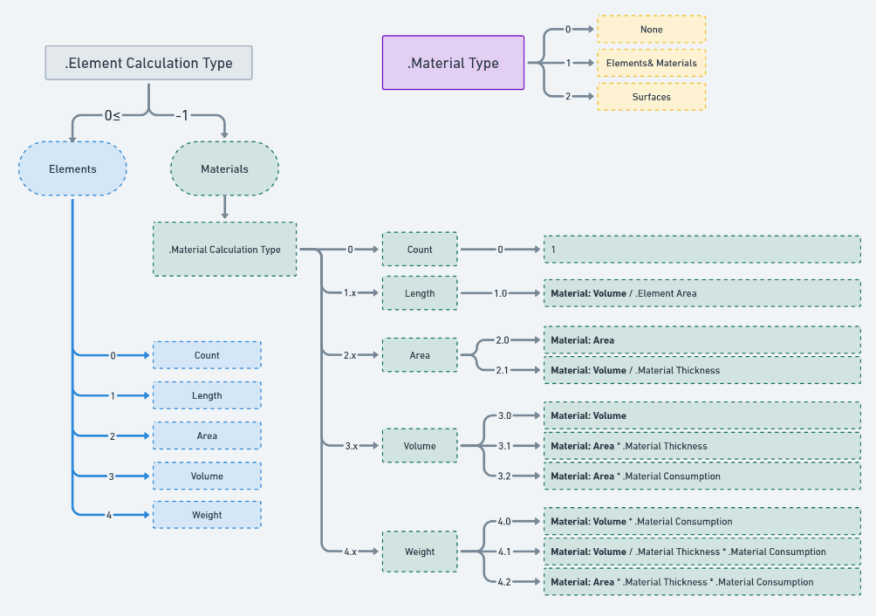


Рисунок 6 – Схема алгоритму обчислення параметрів елемента залежно від його конструктивного типу та типу матеріалу.

Figure 6 – Diagram of the algorithm for calculating element parameters based on its structural type and material.

Особливу увагу приділено елементам гідроізоляції та покриттів. Залежно від обраного підходу до моделювання, їх можна розраховувати як за допомогою знаходження площі фарбування (інструмент Paint), так і на основі Solid-геометрії, визначаючи площу покриття виходячи з об'єму та товщини матеріалу.

Крім того, реалізовано гнучку систему одиниць вимірювання. Для кожного елемента можна налаштувати як метод розрахунку, так і одиницю, у якій буде представлено значення (наприклад, м, см, мм т тощо). Це дозволяє адаптувати специфікацію до вимог замовника або особливостей проєкту без необхідності створення нових шаблонів специфікацій. На рисунку 7 показано типи елементів і типи даних, що використовуються для їх розрахунку.

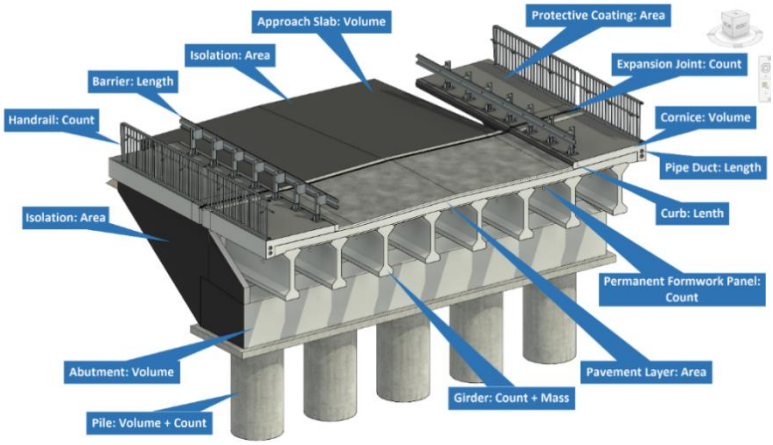
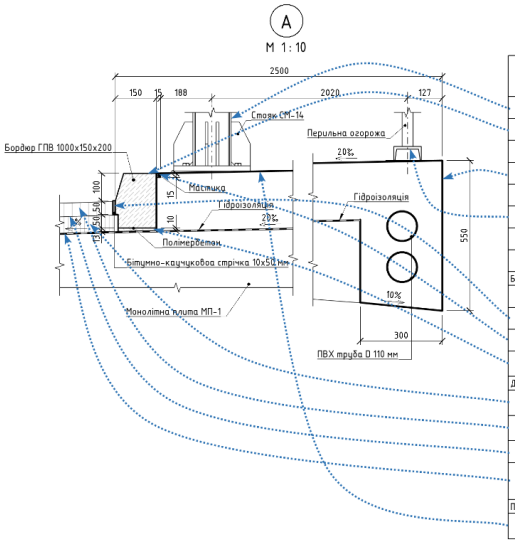


Рисунок 7 *– Т*ипи елементів і типи даних, що використовуються для їх розрахунку.
Figure 7 – Types of elements and the corresponding data used for their calculation.

У результаті була створена універсальна, повністю автоматизована специфікація конструктивних елементів (рисунок 8). Вона не прив'язана до одного способу моделювання й дозволяє проєктувальникам обирати зручний підхід у кожному конкретному випадку.



Специфікація елементів

Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Маса од.кг	Примітки
	арк. 29	Бар'єрна огорожа	234.2		пог.м
	ВВ/2023-ШС.БР	Бордюр ГПВ 1000х150х200	236		шт.
ДШ-1	арк. 27	Деформаційний шов ДШ-1	2		шт.
МТ-1	арк. 26	Монолітний тротуар МТ-1	131.7		м³
	SPO-370-RF(4)	Опора освітлення	4		шт.
	арк. 30	Перильна огорожа П-1	12		пог.м
	арк. 30	Перильна огорожа П-2	216		пог.м
		Матеріали			
Бордюри					
		Анкери в бортовому камені	468		шт.
		Бітумно-каучукова стрічка 10х50 мм	245.9		пог.м
		Мастика	57.9		л
		Полімербетонна основа під бортовий камінь товщиною 10 мм	37.3		м²
Дорожній одяг					
		Асфальтобетон. АСГ.Др.Щ.А.НП.І БНД 70/100 товщиною 6 см	867		м²
		Асфальтобетон. АСГ.Др.Щ.А.НП.І БМПА 70/100-55 товщиною 5 см	862.6		м²
		Бітумна емульсія ЕКШ-60, 0.4 л/м²	151.4		л
		Система бітумно-латексної гідроізоляції залізобетонної плити проїзної частини	1340.9		м²
Покриття тротуарів					
		Система тонкошарового дорожнього гідроізоляційного покриття тротуарів	549.4		м²

Рисунок 8 – Отримана з моделі специфікація та відповідні елементи на кресленні.
Figure 8 – Specification generated from the model and the corresponding elements in the drawing.

Автоматизація генерації креслень

Наступним ключовим напрямком автоматизації стало формування креслень у середовищі Revit. З метою уніфікації та прискорення процесу оформлення було створено набір шаблонів видів, аннотативних елементів та штампів креслень. Особлива увага приділялася розробці родин для оформлення армування: створено власні марки для арматурних стрижнів і каркасів, що враховують специфіку їхнього відображення та вимоги до робочих креслень (рисунок 9).

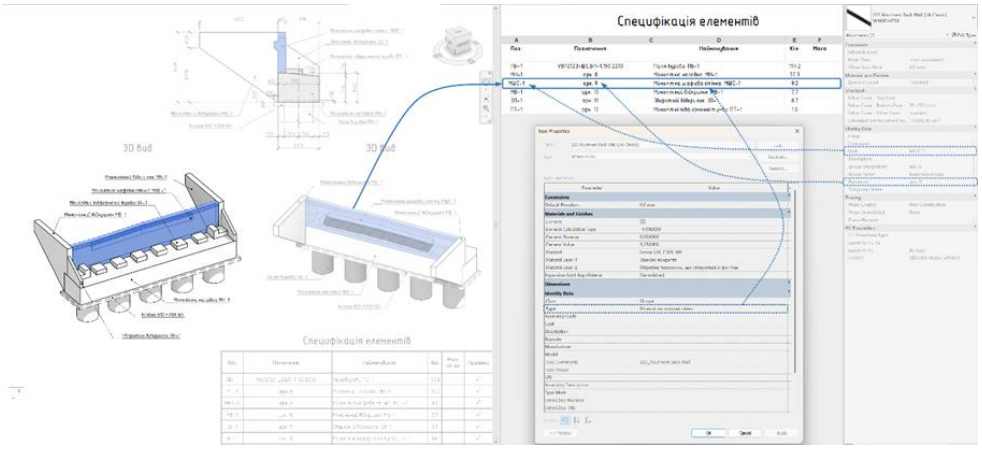


Рисунок 9 – Модель як єдине джерело даних: інформація про елемент представлена як у специфікації, так і на кресленні..
Figure 9 – Model as a single source of data: element information is presented both in the specification and in the drawing.

Для інших конструктивних елементів реалізовано підхід з використанням універсальної марки. Оскільки всі елементи проєкту підпорядковані єдиній системі параметрів, немає необхідності створювати окремі індивідуальні марки для кожного типу. Це значно спрощує процес розробки оформлення документації, робить його більш стандартизованим та контрольованим.

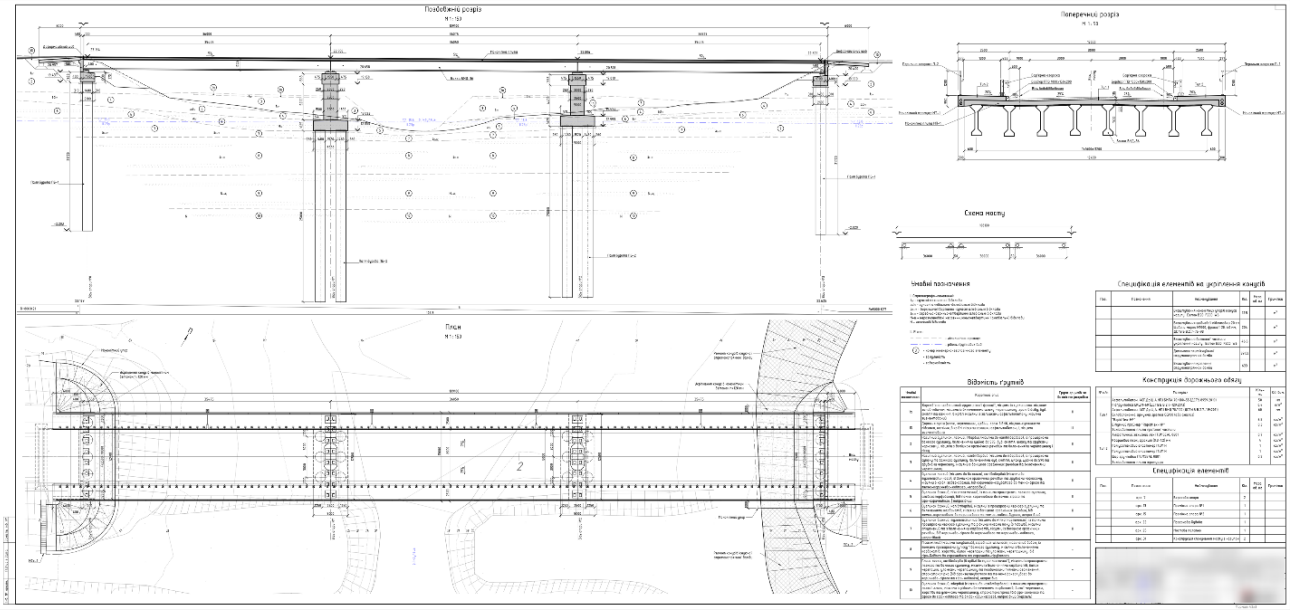


Рисунок 10 – Креслення, отримані в Revit. Загальний вигляд мосту.
Figure 10 – Drawings generated in Revit: general view of the bridge.

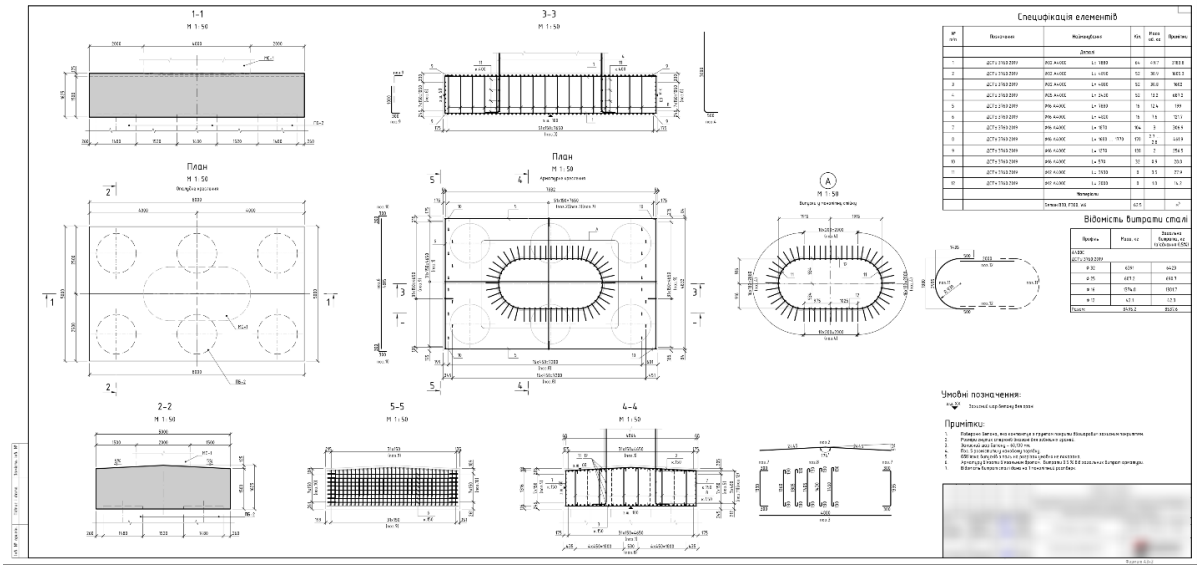


Рисунок 11 – Фундамент проміжної опори.
Figure 11 – Pier foundation drawing.

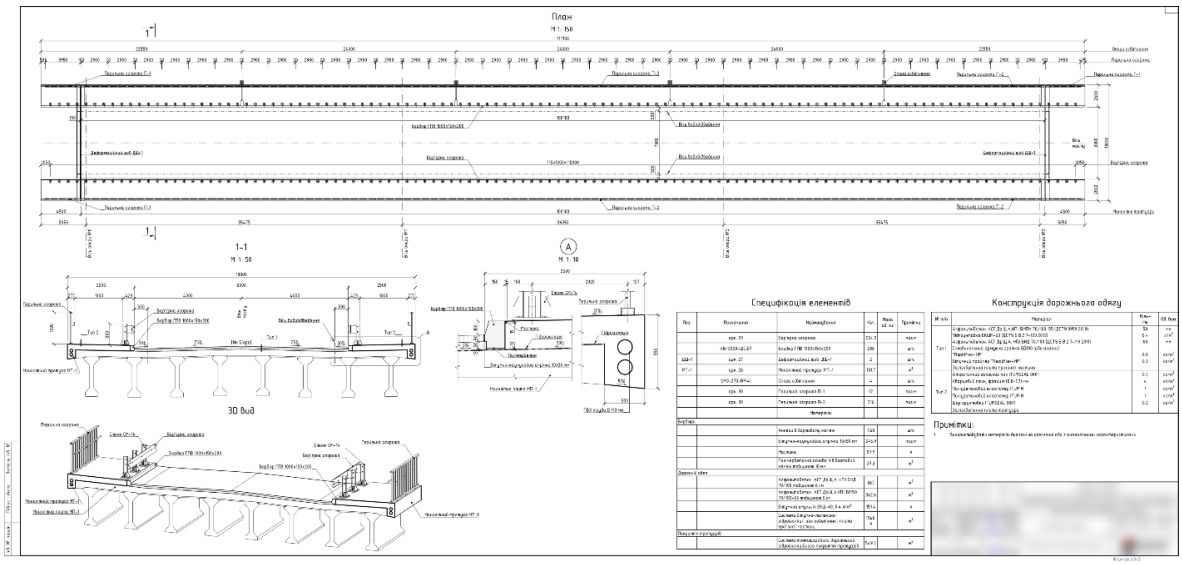


Рисунок 12 – Монтажна схема мостового полотна.
Figure 12 – Assembly scheme of the bridge deck.

Визначення координат елементів конструкції.

З метою підвищення точності проєктної документації та зменшення потенційних помилок під час будівництва були визначені координати ключових конструктивних елементів. Для реалізації цього процесу розроблено низку скриптів у середовищі Dynamo та використано параметризовані сімейства.

Нижче наведено приклади застосування цих методів для різних типів елементів:

- палі: застосовувалася вкладена родина координатної точки, а автоматична нумерація реалізована за допомогою скрипта. Такий підхід забезпечує уніфіковане маркування.
- фундаменти та опори: координатні точки розміщувалися вручну або напівавтоматично за допомогою скрипта, який визначає характерні точки ребер конструкцій. Це дозволяє зменшити ручну роботу та уникнути помилок при розміщенні контрольних координатних точок (рисунок 13).

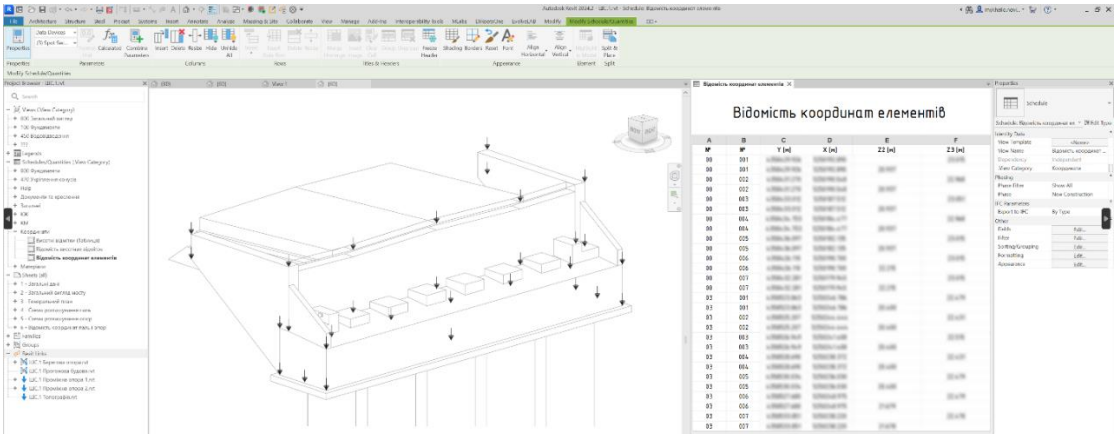


Рисунок 13 – Інтерфейс Revit: ліворуч – аксонометричний вигляд берегової опори та координатних точок, праворуч — специфікація точок із заповненими координатами за допомогою Dynamo.

Figure 13 – Revit interface: left – axonometric view of the abutment and reference points; right – points specification with coordinates populated using Dynamo

- Опорні частини: координати визначалися повністю автоматизовано. Нумерація формувалася на основі параметрів самих опорних частин, що дозволяє швидко генерувати таблиці координат без ручного втручання.
- Прогонова будова: для складних елементів, зокрема ребер монолітної плити, використовувався скрипт, який визначає координати точок перетину умовної площини з ребрами елемента. Це забезпечує точне визначення координат навіть у випадках складної геометрії (рисунок 14).

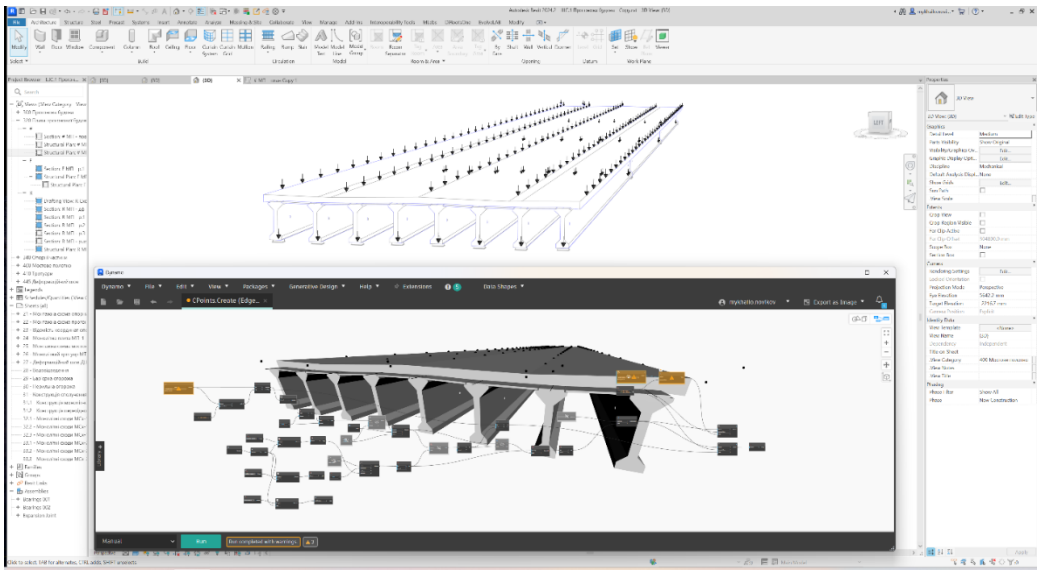


Рисунок 14 – Інтерфейс Revit: зверху – аксонометричний вигляд прогонової будови та координатних точок; знизу — інтерфейс Dynamo із схемою скрипта, за допомогою якого розташовувалися та визначалися координати точок

Figure 14 – Revit interface: top – axonometric view of the superstructure and reference points; bottom – Dynamo interface with the script diagram used for positioning and calculating point coordinates

Комбінація цих методів дозволяє швидко формувати таблиці координат конструктивних елементів, знижувати ризики помилок на етапі будівництва та підвищувати загальну якість робочої документації.

2.4 Методи збору та аналізу даних.

Метою збору даних було оцінити повноту параметрів та структурованість BIM-моделей, а також відповідність проєктним шаблонам для різних типів конструктивних елементів і матеріалів. Для перевірки правильності розміщення координат використовувався спеціальний скрипт, який створював точки координат на основі таблиць Excel. Таким чином розв'язувалася зворотна задача: з таблиць із готовими координатами автоматично формувалися відповідні точки у моделі, що забезпечувало перевірку й контроль просторових даних.

2.5 Методологія порівняння

У межах цього дослідження деталізоване порівняння проводилося лише на етапі проєктування опалубки та армування берегових опор, включаючи опалубку та армування. Порівняльний аналіз здійснювався між традиційним підходом (AutoCAD + Excel) та автоматизованим (Revit + Dynamo).

Для збору даних було виконано практичне моделювання та креслення однакових опор обома підходами (рисунок 15):

- У AutoCAD для армування використовувалися динамічні блоки арматурних стрижнів, що значно прискорювало процес креслення та розрахунок довжин арматурних елементів. Остаточні специфікації та відомості обсягів робіт формувалися за допомогою комбінації AutoCAD та Excel.
- У Revit застосовувався описаний у статті підхід із використанням шаблонів, типових родин і параметричних моделей. При цьому у порівняльному аналізі не враховувався час, витрачений на первинне налаштування шаблонів, оскільки він не відноситься до рутинної розробки документації.

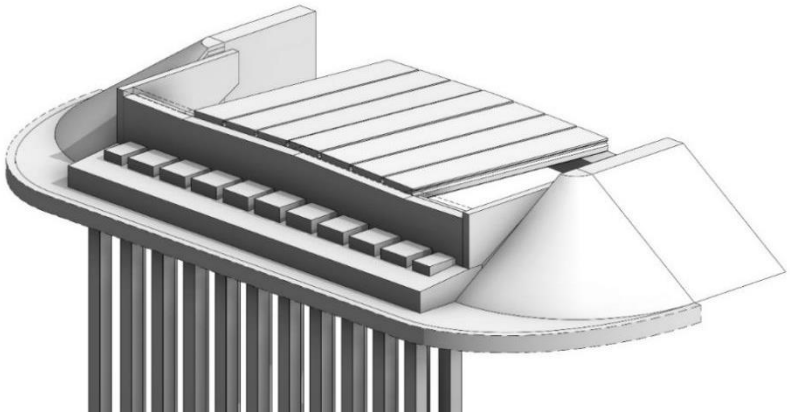


Рисунок 15 – Берегова опора, що використовувалася у порівняльному аналізі моделювання та армування (AutoCAD vs Revit)

Figure 15 – Abutment used in the comparative analysis of modeling and reinforcement (AutoCAD vs. Revit)

Було проведено два види порівнянь:

1. **Розроблення з нуля** — як в AutoCAD, так і в Revit моделювання та креслення виконувалися з нуля, проте з використанням наявних напрацювань (шаблонів, родин, бібліотек).
2. **Коригування готового креслення опори** під нову або схожу опору — цей варіант відображає більш типову ситуацію у практичній роботі, тому дані цього порівняння є більш релевантними для оцінювання ефективності автоматизації.

Для більш коректного порівняння кожен з підходів було застосовано тричі, тобто було розроблено три окремі опори двома методами. Це дозволило оцінити повторюваність результатів і зменшити вплив випадкових факторів.

Ключовими показниками для оцінювання ефективності були:

- час підготовки креслень та специфікацій армування;
- типові помилки ручного редагування (рисунок 17);
- обсяг ручної праці, пов'язаний із внесенням змін.

Результати показали суттєві переваги автоматизованого підходу:

- час підготовки документації від початку скоротився на 10–12% (рисунок 16);

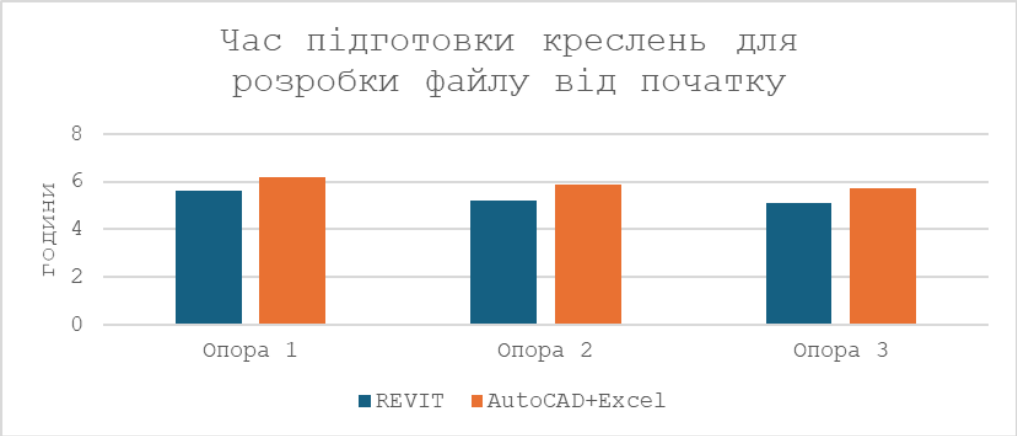


Рисунок 16 – Інфографіка витрат часу на підготовку креслень для розроблення файлу від початку)

Figure 16 – Infographic of time expenditures for preparing drawings when developing a file from scratch

- час адаптації документації скоротився на 50–55% (рисунок 17);

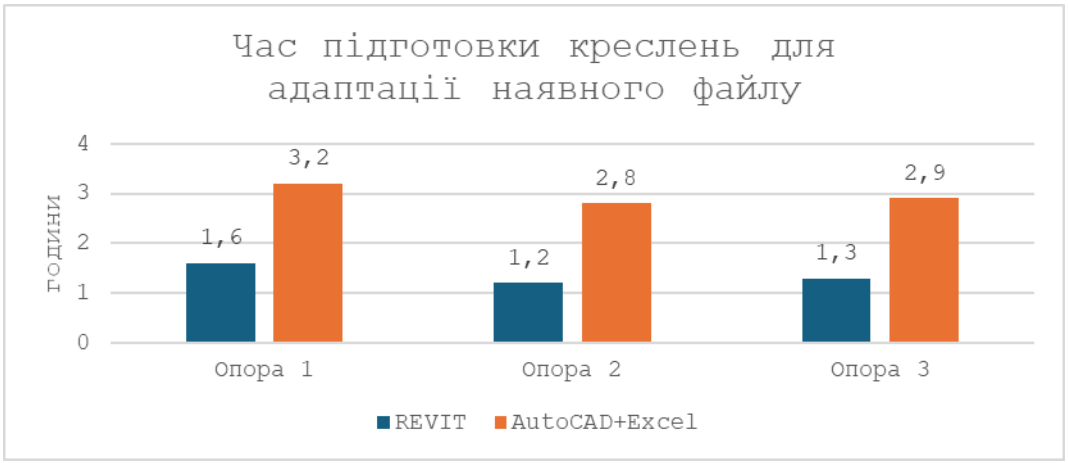


Рисунок 17 – Інфографіка витрат часу на підготовку креслень для адаптації наявного файлу

Figure 17– Infographic of time expenditures for preparing drawings when adapting an existing file

- частка помилок, пов'язаних із ручним введенням даних та неузгодженістю креслень і специфікацій, знизилася на 57–82% (рисунок 18);

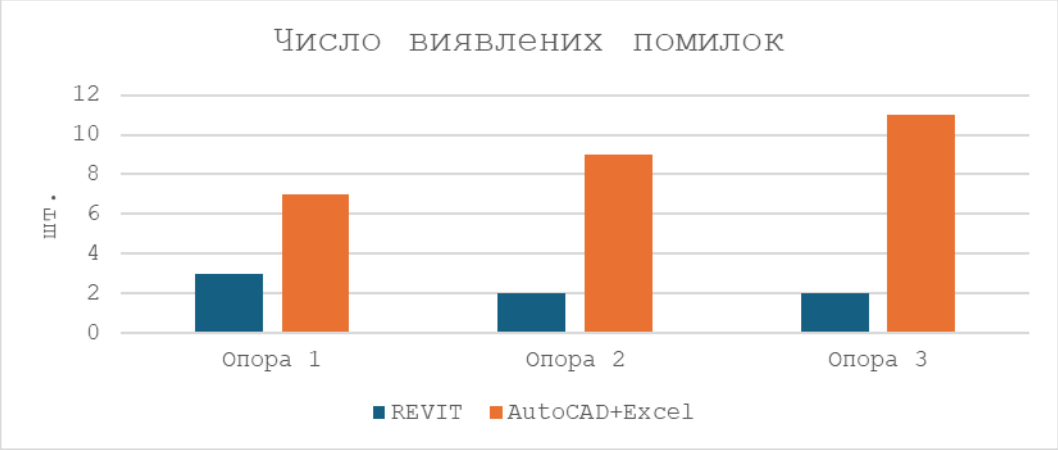


Рисунок 18 – Інфографіка числа виявлених помилок
Figure 18– Infographic of the number of detected errors

Ці результати свідчать про ефективність застосування BIM-методології для генерації робочої документації проєктів проміжних опор.

2.6 Обмеження та контекст.

Дослідження охоплювало чотири кейси, що представляють собою типові мостові споруди зі схожими конструктивними характеристиками: залізобетонні прогонові будови, розташовані на прямій у плані та з повздовжнім профілем без вертикальної кривої. Такий тип мостів є поширеним в українській практиці, однак результати дослідження слід інтерпретувати з обережністю, оскільки вони стосуються обмеженого класу конструкцій. Розміщення споруд на прямій значно спростило як процес моделювання, так і підготовку робочої документації, адже в середовищі Revit існують функціональні обмеження при роботі з криволінійними об’єктами. Зокрема, неможливо здійснити прив’язку елементів до криволінійної осі або формувати повздовжні розрізи по дузі, що унеможливлює повноцінну автоматизацію для мостів зі складною геометрією.

У методології дослідження наявні кілька обмежень. По-перше, не проводилось формалізоване опитування користувачів або незалежна валідація результатів сторонніми експертами. По-друге, відсутня контрольна група, яка б дозволила порівняти результати BIM-проєктування з традиційними методами у рамках одного й того ж об’єкта. Повноцінне порівняння ефективності автоматизації на всьому етапі підготовки робочої документації — від моделювання до специфікацій — потребувало б виконання ідентичного проєкту як у BIM-середовищі, так і за допомогою класичних інструментів (AutoCAD, Excel), що наразі є надто ресурсозатратним. У межах цього дослідження вдалося здійснити деталізоване порівняння лише на окремому етапі — проєктування опалубки та армування берегових опор.

Ще одним важливим аспектом є організаційний контекст впровадження. Усі етапи автоматизації виконувалися в межах однієї проєктної організації. Значні ресурси були спрямовані на створення бібліотеки параметричних родин, розробку системи специфікацій та написання скриптів перевірки. Це зумовлює ситуацію, коли на початкових етапах впровадження BIM-інструментів економічні переваги є неочевидними або навіть компенсуються додатковими трудовитратами. Проте із зростанням кількості реалізованих проєктів ефективність і рентабельність технології автоматизації суттєво зростає завдяки повторному використанню напрацьованих рішень.

3. Результати

3.1 Використані інструменти та засоби автоматизації

У процесі моделювання та підготовки робочої документації було застосовано комплекс BIM-інструментів, орієнтованих на оптимізацію роботи зі збірно-монолітними залізобетонними мостами. Зокрема:

- Параметричні родини використовувалися для моделювання конструкцій, що забезпечувало гнучкість у створенні різних елементів.
- Шаблони креслень, уніфіковані відповідно до внутрішніх стандартів компанії, дозволяли прискорити формування комплекту креслень та забезпечити єдину стилістику оформлення.
- Специфікації, які формувалися за допомогою заздалегідь налаштованих шаблонів, базувалися на системі параметрів елементів і матеріалів.
- Автоматичні марки реалізовувалися через додавання параметрів до родин із відповідним форматуванням, що дозволяло динамічно формувати позначення залежно від типу, розмірів та призначення елементів.
- Скрипти Dynamo застосовувалися для автоматичного розміщення координатних точок та визначення глобальних координат конструкцій.

3.2 Ефективність та економія часу

Порівняльний аналіз показав, що використання вищезазначених інструментів дозволило зменшити загальний час підготовки креслень та специфікацій на 50–55% у порівнянні з традиційним ручним методом у AutoCAD. Особливо суттєве скорочення часу спостерігалося на етапі:

- Створення креслення опалубки
- Оформлення арматурних креслень
- Створенні специфікацій
- Визначенні координат

3.3 Точність, уніфікація та повторне використання.

Застосування BIM-моделювання суттєво підвищило наочність проєктних рішень, що сприяло кращому розумінню конструкції на всіх етапах узгодження. Використання інформаційної моделі як єдиного джерела даних забезпечило високу точність формування специфікацій та оперативність у внесенні змін: будь-яке оновлення моделі автоматично відображалося в усіх пов’язаних специфікаціях.

3.4 Проблеми та обмеження.

У процесі впровадження BIM-інструментів було виявлено низку суттєвих викликів, які вплинули на ефективність роботи на початкових етапах:

- Необхідність розробки параметричних родин, зокрема складних компонентів для моделювання стоянів, деформаційних швів та інших нетипових конструкцій;
- Потреба у створенні власної системи параметрів з урахуванням національних нормативів, локальної термінології та особливостей інженерної практики;
- Необхідність адаптації шаблонів специфікацій відповідно до вимог державних стандартів та прийнятого стилю оформлення робочої документації;
- Складність розробки та налаштування Dynamo-скриптів, особливо для фахівців без досвіду візуального програмування;
- Необхідність додаткового навчання інженерного персоналу, який не мав попереднього досвіду роботи не лише в середовищі Revit, але й з розробленими внутрішніми шаблонами. Незважаючи на ці труднощі, усі зазначені виклики поступово були подолані шляхом накопичення досвіду, стандартизації процесів та внутрішнього навчання в межах організації.

4. Обговорення.

Результати дослідження засвідчили, що успішність впровадження автоматизації у BIM-процесах значною мірою залежить від внутрішньої структури шаблону Revit та узгодженості параметрів у моделі. Чітко організований шаблон із заздалегідь налаштованими стилями, родинами та специфікаціями забезпечує передбачуваність і відтворюваність автоматизованих процедур, особливо у великих проєктах. Узгоджена система параметрів гарантує коректну роботу скриптів, зменшує ризик помилок і дозволяє автоматично генерувати специфікації.

Процес формування шаблонів специфікацій, зокрема створення системи параметрів, написання формул та адаптація родин до шаблону, виявився складним. Державні стандарти переважно орієнтовані на класичний підхід до проєктування, що ускладнює їхнє повноцінне відтворення у Revit. У багатьох випадках для отримання специфікацій, які відповідають нормативним вимогам, необхідно

вводити додаткові параметри, ускладнювати розрахункові формули або значно змінювати систему моделювання. Це підвищує ризик помилок та інколи робить реалізацію шаблонів невиправдано складною або навіть неможливою.

Перспективними напрямами розвитку BIM у Revit для інфраструктурних проєктів є створення скриптів, алгоритмів, параметричних компонентів та шаблонів, які дозволяють ефективно працювати зі складними монолітними криволінійними конструкціями, включно з постнапруженими елементами. У таких випадках наявність 3D-моделі стає особливо важливою, а автоматизація процесів — більш ефективною (рисунок 18).

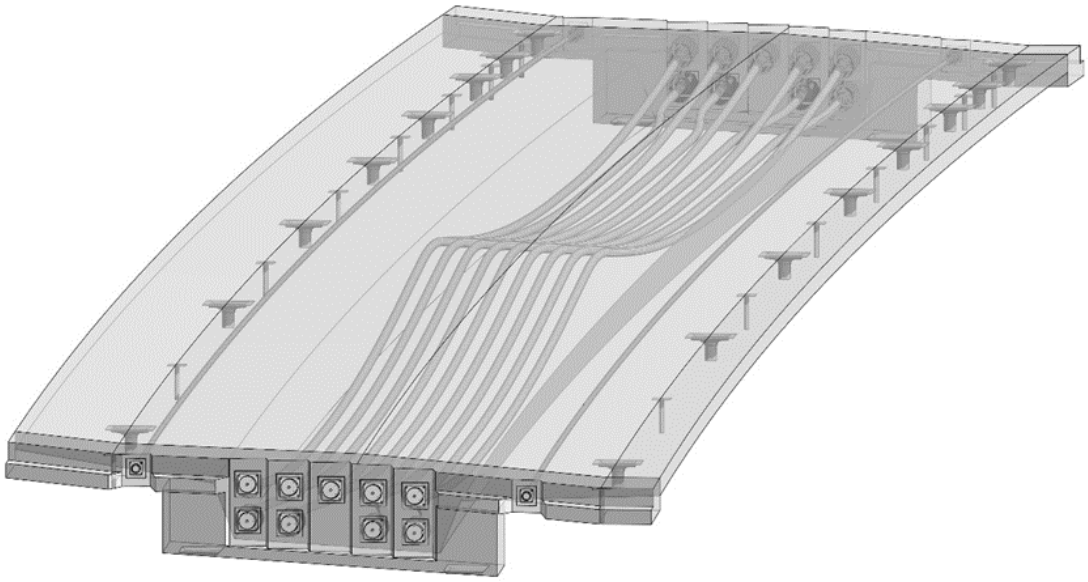


Рисунок 18 – Експериментальна BIM-модель криволінійної залізобетонної плитно-ребристої прогонової будови з канатами постнапруження, розроблена для дослідження автоматизації процесів у Revit і Dynamo.

Figure 18– Experimental BIM model of a curved reinforced concrete slab–girder superstructure with post-tensioning cables, developed for investigating process automation in Revit and Dynamo

Висновки. Результати дослідження засвідчили, що застосування BIM-інструментів у середовищі Autodesk Revit суттєво підвищує ефективність підготовки робочої документації для мостів, зокрема скорочує час на розроблення креслень і специфікацій, підвищує точність та дозволяє повторно використовувати шаблони, родини й скрипти.

Водночас виявлено низку викликів: складність первинного налаштування, функціональні обмеження Revit для інфраструктурних об’єктів, труднощі з дотриманням державних стандартів та потреба у додатковій підготовці персоналу.

Подальший розвиток BIM-автоматизації в Україні критично важливий для підвищення якості та конкурентоспроможності мостобудування. Рекомендується стандартизувати параметри моделей, адаптувати нормативні документи до функціональних можливостей сучасного ПЗ, стимулювати впровадження BIM через державні програми та пріоритетне фінансування пілотних проєктів, а також розвивати освітні програми та обмін напрацюваннями між командами.

Перелік посилань

1. Concept of implementation of BIM - Building Information Modeling in Ukraine / Ed. O. Cheverda.: EU project "Assistance to authorities of Ukraine in improving infrastructure project cycle management", 2019.

2. Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 17.02.2021 No. 152-p - On approval of the Concept for the implementation of building information modelling technologies (BIM technologies) in Ukraine and approval of the action plan for its implementation.
3. Girardet, A., & Boton, C. (2021). A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis. Automation in Construction, 126, 103679.
4. Nöldgen, M. BIM in Bridge and Infrastructure Design. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022.
5. Luo, Y. BIM for Bridge Design. IABSE Guangzhou, 2016.
6. Handbook for the Introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector. EU BIM Task Group, 2018.
7. Tita, E. E.; Peilun, S.; Watanabe, G. Development of the parametric Building Information Modeling of bridge components and the integration of bridge model by visual programming language. Timor-Leste Academic Journal of Science and Technology (TAJST), 5(1), 125–126, 2023.
8. Järvenpää, M.-E. Use of BIM in Design and Construction of Chenab Bridge in India. PROF-ENG, s. r. o. (Ltd.), Id. Number: CZ02577933, 2023.
9. Ferrándiz, J., Banawi, A., & Peña, E. Evaluating the benefits of introducing “BIM” based on Revit in construction courses, without changing the course schedule. Universal Access in the Information Society, 17, 491-501. 2018.
10. Akter, J., Datta, S., Islam, M., Tayeh, B., Sraboni, S., & Das, N. Assessment and analysis of the effects of implementing building information modelling as a lean management tool in construction management. International Journal of Building Pathology and Adaptation, 2024.
11. Calculating Costs and Benefits for the Use of Building Information Modelling in Public Tenders. European Innovation Council and SMEs Executive Agency (EISMEA), 2021.
12. Abu Dabous, S.; Al-Ruzouq, R.; Llort, D. Three-dimensional modeling and defect quantification of existing concrete bridges based on photogrammetry and computer-aided design. Ain Shams Engineering Journal, 14(12), 102231, 2023.
13. Blanco Rávena, R.; Martínez García, J.; Mozas González, B.; García Alberti, M.; Arcos Álvarez, A. A. Use of BIM methodology in the re-modelling of an existing bridge. Anales de Edificación, 5(3), 100, 2019.
14. Cavieres-Lagos, S.; Muñoz La Rivera, F.; Atencio, E.; Herrera, R. F. Integration of BIM tools for the facility management of railway bridges. Applied Sciences, 14(14), 6209, 2024.

BIM TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR AUTOMATING PROJECT DOCUMENTATION IN BRIDGE ENGINEERING IN UKRAINE: ANALYSIS OF PRACTICAL EXPERIENCE

Medvediev Kostiantyn V., Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, National Transport University, Department of Bridges, tunnels and hydraulic structures, Professor, e-mail: kvmedvediev@gmail.com, +380442807978, https://orcid.org/0000-0002-0704-7093.

Novikov Mykhailo M, Bachelor's dergree, BIM-manager of LLC Valbek, Kyiv, Ukraine, e-mail: nov.mih.mih@gmail.com, +380937564012, https://orcid.org/0009-0008-6459-3745.

Galchenko Oleksii M, Master’s dergree, Chief project engineer of LLC Valbek, Kyiv, Ukraine, e-mail: galchenko1989@gmail.com, +380634060617, https://orcid.org/0009-0000-4002-1082.

Dudarenko OleksandrV., Master’s dergree, Director of LLC Valbek, Kyiv, Ukraine, e-mail: alexandr.dudarenko@gmail.com, +380931881553, https://orcid.org/0009-0004-9726-2839.

Andrii Koretsky S., Candidate of Technical Science , Associate Professor, Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: andriy.koretskyi@ntu.edu.ua tel,+3800505433772, https://orcid.org/0000-0003-0307-0306

Summary. The results of the study demonstrated that the use of BIM tools in the Autodesk Revit environment significantly enhances the efficiency of preparing working documentation for bridges, notably reducing the time required for developing drawings and specifications, improving accuracy, and enabling the reuse of templates, families, and scripts.

At the same time, several challenges were identified, including the complexity of initial setup, functional limitations of Revit for infrastructure objects, difficulties in complying with national standards, and the need for additional personnel training.model, and the real object, which significantly saves time and improves design and construction efficiency.

Keywords: bridge design, digital model, information modeling, building information modeling (BIM), Revit, Dynamo, bridge structures, project documentation preparation, parametric modeling

References

1. Concept of implementation of BIM - Building Information Modeling in Ukraine / Ed. O. Cheverda.: EU project "Assistance to authorities of Ukraine in improving infrastructure project cycle management", 2019.
2. Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 17.02.2021 No. 152-p - On approval of the Concept for the implementation of building information modelling technologies (BIM technologies) in Ukraine and approval of the action plan for its implementation.
3. Girardet, A., & Boton, C. (2021). A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis. Automation in Construction, 126, 103679.
4. Nöldgen, M. *BIM in Bridge and Infrastructure Design.* Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022.
5. Luo, Y. *BIM for Bridge Design.* IABSE Guangzhou, 2016.
6. *Handbook for the Introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector.* EU BIM Task Group, 2018.
7. Tita, E. E.; Peilun, S.; Watanabe, G. *Development of the parametric Building Information Modeling of bridge components and the integration of bridge model by visual programming language.* Timor-Leste Academic Journal of Science and Technology (TAJST), 5(1), 125–126, 2023.
8. Järvenpää, M.-E. *Use of BIM in Design and Construction of Chenab Bridge in India.* PROF-ENG, s. r. o. (Ltd.), Id. Number: CZ02577933, 2023.
9. Ferrándiz, J., Banawi, A., & Peña, E. *Evaluating the benefits of introducing "BIM" based on Revit in construction courses, without changing the course schedule*. Universal Access in the Information Society, 17, 491-501. 2018.
10. Akter, J., Datta, S., Islam, M., Tayeh, B., Sraboni, S., & Das, N. *Assessment and analysis of the effects of implementing building information modelling as a lean management tool in construction management*. International Journal of Building Pathology and Adaptation, 2024.
11. *Calculating Costs and Benefits for the Use of Building Information Modelling in Public Tenders.* European Innovation Council and SMEs Executive Agency (EISMEA), 2021.
12. Abu Dabous, S.; Al-Ruzouq, R.; Llort, D. *Three-dimensional modeling and defect quantification of existing concrete bridges based on photogrammetry and computer-aided design.* Ain Shams Engineering Journal, 14(12), 102231, 2023.
13. Blanco Rávena, R.; Martínez García, J.; Mozas González, B.; García Alberti, M.; Arcos Álvarez, A. A. *Use of BIM methodology in the re-modelling of an existing bridge.* Anales de Edificación, 5(3), 100, 2019.
14. Cavieres-Lagos, S.; Muñoz La Rivera, F.; Atencio, E.; Herrera, R. F. *Integration of BIM tools for the facility management of railway bridges.* Applied Sciences, 14(14), 6209, 2024.

УДК 624.21:625.745.1 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-080-092**
UDC 624.21:625.745.1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН КОРОЗІЇ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ ПРИ АВАРІЙНОМУ РУЙНУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО МОСТА

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF CEMENT STONE CORROSION IN THE EMERGENCY DESTRUCTION OF THE DECK STRUCTURE OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE



***Онищенко Артур Миколайович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет*
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010
e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-1040-4530



***Коваленко Валентина Володимирівна.** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства НАН України*
вул. Омеляна Пріцака (Кржижановського), 3, Київ, Україна, 03142
e-mail: vkovdp@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1196-7730



***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/0000-0002-8751-9934



***Ковальчук Віталій Володимирович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри залізничного транспорту, Національний університет «Львівська політехніка»*
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013
e-mail: kovalchuk.diit@gmail.com
https://orcid.org/0009-0001-1715-6058

Анотація. Робота присвячена проведенню досліджень стану конструкцій мосту Повітрофлотського проспекту через р. Либідь в м. Київ. Для цього застосовано методи вибракованої оцінки залізобетонних конструкцій прогонової будови мосту, експрес-методики мікроструктурного, мікрорентгеноспектрального та фрактографічного аналізів.

Метою роботи є дослідження та виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій через р.Либідь.

Об’єкт дослідження: конструкції прогонових будов моста.

У результаті досліджень встановлено, що у складі бетону на границі заповнювачів піску та цементного каменю спостерігається наявність підвищеної кількості лужних металів та галогенів, яка перевищує вимоги державних стандартів у декілька разів.

Встанволено, що середнє значення концентрації оксиду сірки складає 4,93 % (мас.). Має місце локальне підвищення концентрації її оксиду до 6,15 % (мас.), що значно перевищує нормативний показник у 3,5 % (мас.). Крім того, значний відсоток вуглецю в структурі цементного каменю усіх зразків свідчить про його карбонізацію, що додатково знижує механічні характеристики бетону в конструкціях мосту.

З метою попереджень випадків передчасного руйнування бетону мостів, шляхопроводів, автодоріг пропонуємо проводити моніторинг якості бетону існуючих конструкцій та під час будівництва нових об’єктів за експрес-методикою мікроструктурного аналізу, а також для наочного спостереження за швидкістю корозійних процесів слід встановити гіпсовий маяк на тріщину на опорній колонні моста з боку тротуару.

Для усунення активного впливу галогенів на структурні перетворення в бетоні, що експлуатується пропонуємо дослідити можливість використання менш агресивних речовин, які менше впливатимуть на корозійні процеси в бетоні і арматурі залізобетонних споруд, але ефективно будуть сприяти очищенню тротуарів та проїзної частини доріг від снігу.

Ключові слова: прогонові будови мостів, балкові мости, бетон, корозія цементного каменю, мікроструктурний аналіз, мікрорентгеноспектральний аналіз, лужно-кремнієвокисла реакція, аварійне руйнування, прогнозування довговічності бетону.

Вступ. Корозія бетону є актуальною проблемою у всіх країнах світу. Особливу увагу процесам корозії цементного каменю приділяють для умов експлуатації бетонних труб в якості обсадних для добичі газу та нафти. Вплив на бетон високих тисків газу CO_2, нафти при високих температурах призводить до прискореної корозії цементного каменя та втраті його механічних властивостей [1–2].

Однак процес карбонізації бетону, який працює на відкритому повітрі відбувається із швидкістю приблизно 20 мм у 25 років. Зниження міцності бетону в приповерхневому шарі відбувається за рахунок впливу карбонільної кислоти, яка знижує лужність цементного каменю. Дана загально відома проблема виникає виключно в приповерхневих ділянках бетонного масиву. Більш небезпечним видом корозії є лужно-кремнієвокисла корозія цементного каменю, яка відбувається у всьому масиві бетону залізобетонних виробів, конструкцій, споруд.

Проблема лужно-кремнієвокислої корозії бетону в Україні досі не контролюється державними організаціями так, наприклад, за умов уведення в 2010 р. ДСТУ Б В. 2.6-145:2010 [3], вимоги цього стандарту не вносяться в проєкти будівництва стратегічних інфраструктурних об’єктів, які будуються за кошти державного бюджету, та споруд комунального загального і промислового користування.

Передчасне руйнування бетону після 1–10 років експлуатації в Україні доволі часте явище при тому, що термін служби бетону складає від 50 до 100 років. Вигода від впровадження зазначеного стандарту в проєктну документацію усіх будівельних об’єктів є очевидною і дотримання норм цього національного стандарту буде сприяти попередженню передчасних руйнувань бетону. Необхідно також зауважити, що традиційні стандартизовані методи досліджень характеристик сировинних матеріалів дозволяють отримати результати аналізів не раніше ніж за тиждень від їх початку, а швидкість переробки цементу та заповнювачів на бетонних заводах і вузлах значно перевищує можливості лабораторних досліджень. Таким чином, неможливість вчасно отримати результати досліджень викликає проблему забезпечення довговічності бетону конструкцій.

Відновлення економіки України потребує значних закордонних інвестицій, в тому числі приватних інвесторів, які будуть стежити за ефективністю власних інвестицій. Таким чином,

застосування стандарту ДСТУ Б В. 2.6-145: 010 [3] сприятиме ефективному витрачанню коштів в будівництві, суттєво підвищить інвестиційну привабливість та ефективність розбудови України.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Довговічність бетону, як основного матеріалу для будівництва інфраструктурних споруд є об'єктом досліджень багатьох вітчизняних авторів, а саме: Пшінька О.М., Рунова Р.Ф., Коваленка В.В., Плугіна А. А. та інш, що відображено у науково-дослідних роботах [4] - [9].

Мостові конструкції витримують значні динамічні навантаження в корозійно-активному середовищі у комплексі із температурними коливаннями. Такі складні умови експлуатації вимагають строгої технологічної дисципліни під час виготовлення та використання мостових конструкцій.

Згідно чинного законодавства в сфері будівництва бетон конструкцій повинен відповідати таким стандартам: ДСТУ: ДСТУ ISO 3696:2003 [10] (ISO 3696:1987, IDT) ДСТУ Б EN12620:2013 [11] ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [3]; ДСТУ Б В.2.7-32-95 [12]; ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [13]; ДСТУ Б В.2.7-71 -98 [14]; ДСТУ Б В.2.7-75-98 [15]; ДСТУ Б В.2.7-210:2010 [16]; ДСТУ Б EN 197-1:2015[17]; ДСТУ 9183:22 [18]; ДСТУ EN 197-2:2023[19]; ДСТУ 8858:2019 [20]. Вміст хлор-іонів у цементобетонах дорожніх не повинен бути більше ніж: 0,2 % від маси цементу для цементобетонів з ненапруженою арматурою та 0,1 % від маси цементу для цементобетонів з напруженою арматурою. Інші не менш важливі вимоги до сировинних матеріалів та бетону наведено в стандартах [21] – [29].

Із проведеного аналізу наукових робіт [1–9] встановлено, що задачі досліжень технічного стану прогонових будов мостів та виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій є актуальними та своєчасними.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій через р. Либідь.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

– провести обстеження конструкцій прогонової будови моста;

– провести експериментальні дослідження із визначення причин аварійного руйнування прогонової будови моста із використанням мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкодженого корозією та цілого бетону конструкцій прогонової будови мосту та опор мосту;

– визначити мікроструктуру та хімічний склад бетону на границі цементний камінь – пісочна частка.

Матеріали та методика досліджень. Проведемо дослідження причин аварійного руйнування мосту через ріку Либідь по Повітрофлотському проспекту в м. Київ. Міст збудовано в 1954 р. з реконструкцією в 1982 р., більшість елементів конструкцій мосту знаходяться в незадовільному стані. Присутнє корозійне розтріскування бетону та руйнування окремих частин бетонного масиву.

Конструкції мостової будови нерівномірно пошкоджені та причини пошкоджень відрізняються: від лужно-кремнієвокислої реакції до прискореного руйнування під дією хімічних реагентів.

Загальний вид пошкоджень наведено на рис. 1. Як видно з рис. 1, а, б на поверхні бетону опор і прогонової будови оголені арматурні прути. За нормативними документами шар бетону над арматурою не повинен бути меншим за 20 мм задля забезпечення захисту арматури від корозії. Також наявна корозія бетону між ребрами мостової балки. Шар бетону над арматурою зруйновано та спостерігається оголена арматурна решітка.

Незахищена арматурна решітка активно кородує та разом із бетоном втрачає проектну міцність. На поверхню бетону виділяється білява кремнієва рідина, що свідчить про активність процесу лужно-кремнієвокислої реакції між цементним каменем та піском у складі бетону.

Огляд нижньої прогонової частини мосту показав наявність подальшого осипання бетонних брил, нещільного прилягання бетону до арматурної решітки (рис. 1, в).

Макроструктурний аналіз бетону прогонової частини мостових конструкцій показав, що бетонна суміш під час будівництва була якісно укладена в конструкціях мосту. Непошкоджені частини конструкції мають гладку поверхню, яка свідчить про відсутність зовнішніх ознак процесів корозійного розтріскування та відносного збереження міцності основних несучих конструкцій (надалі

мікроструктурний аналіз має показати наскільки бетон є дефектним та можливий термін його подальшої експлуатації).



Рисунок 1 – Загальний вигляд пошкоджень мосту Повітрофлотського проспекту через р. Либідь в м. Київ

Figure 1 – General view of the damage to the Povitroflotskyi Avenue bridge across the Lybid River in Kyiv

Наявність активної корозії балок мостових говорить про необхідність їх заміни. Руйнування огороджень і частини пішохідного проходу мосту відбулося з однієї сторони мосту. Це доводить, що подібна аварійна ситуація відбулася із зовнішніх причин (нанесення, або задування вітром речовини агресивної до цементного каменю бетону).

Таким чином, усі наведені на рис. 1 дефекти прогонових будов моста є результатом дії різних зовнішніх та внутрішніх факторів на бетон споруди.

Аварійне руйнування бетону мостових конструкцій ініційоване різними типами корозії бетону. Переважне значення має лужно-кремнієвокисла корозія, швидкість якої прискорюється активними реагентами. Макроструктурний аналіз виявив наявність виділень кремнієвої рідини із зони прискоренного руйнування бетону. Для визначення подальшої активності процесу корозії необхідно встановити гіпсові маяки на тріщини на опорах мосту.

Результат експериментальних досліджень із визначення причин аварійного руйнування прогонової будови моста із дослідженням мікроструктури та хімічного складу. Більш глибоке вивчення причин аварійного руйнування проводили за допомогою дослідження мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкодженого корозією та цілого бетону конструкцій прогонової будови моста та опор моста.

Аналіз хімічного складу цементу, окремих піщаних часток, цементного каменю та продуктів лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні прогонової частини моста і опор проводили із використанням методів скануючої мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу. Результати кількісного аналізу вмісту хімічних елементів, та особливо співвідношень концентрацій хімічних елементів в структурних складових на плоских поверхнях речовин та кристалах (наприклад, кремнієвого гелю, на розколі пісочних часток, масиві цементного каменю) у високому вакуумі з напругою, яка прискорює – 10 кВ, дозволяють виявляти наявність та кількість хімічних елементів з точністю до 0,01 відсотка мас. Що є на рівні, або перевищує точність діючих стандартних методів аналізу. При цьому необхідно відмітити швидкість проведення вказаних випробувань, що дозволяє їх віднести до експрес-методів визначення

характеристик матеріалів. Експрес методику важливо поєднувати із застосуванням традиційних методів аналізу, які прописані в відповідних діючих стандартах України.

У дослідженні проведено послідовне сканування структурних складових бетону за допомогою енергодисперсійного аналізатора з Оксфордськими програмами кількісного аналізу хімічних елементів. Максимальна точність отриманих результатів мікрорентгеноспектрального аналізу базується на застосованому методі, при якому дослідження зразків проводиться у глибокому вакуумі до 10^{-5} Па.

Від відповідності характеристик цементу нормам стандарту ДСТУ Б.В 2.7-46:2010 залежить структуроутворення цементного каменя, морфологія кристалів, фізико-механічні характеристики та довговічність залізобетонних виробів. При підвищеній лужності цементу (приведений коефіцієнт лужності ($Na_2O + 0.658\ K_2O$) більшій за 0,6 % (мас.)) в процесі гідратації та під час експлуатації мостових конструкцій відбувається реакція хімічної взаємодії луг цементу з кислими заповнювачами, які за стандартами не повинні міcти більше ніж 50 ммоль/л діоксиду кремнію розчинного в лугах (аморфного кремнезему) ДСТУ Б В.2.6-145:2010.

За державним стандартом ДСТУ Б.В 2.7-46:2010 в портландцементі співвідношення за масою кальцій оксиду до силіцій діоксиду повинно становити не менше ніж 2,0, а масова частка магній оксиду не повинна перевищувати 5 % (мас.), вміст сірки у перерахунку на SO_3 не повинен перевищувати 3,5 % (мас.), але бути більше ніж 1 % (мас.), глин не більше 1,2 % (мас.), вміст хлорид-іонів не повинен перевищувати 0,1 % (мас.).

Середній коефіцієнт приведеної лужності цементу непошкодженого бетону першого зразка становить 1,15 % (мас.), що у 1,9 рази перевищує нормативний показник, визначений ДСТУ Б В.2.6-145:2010 (ГОСТ 31384:2008, NEQ). Результати досліджень наведено на рис. 2.

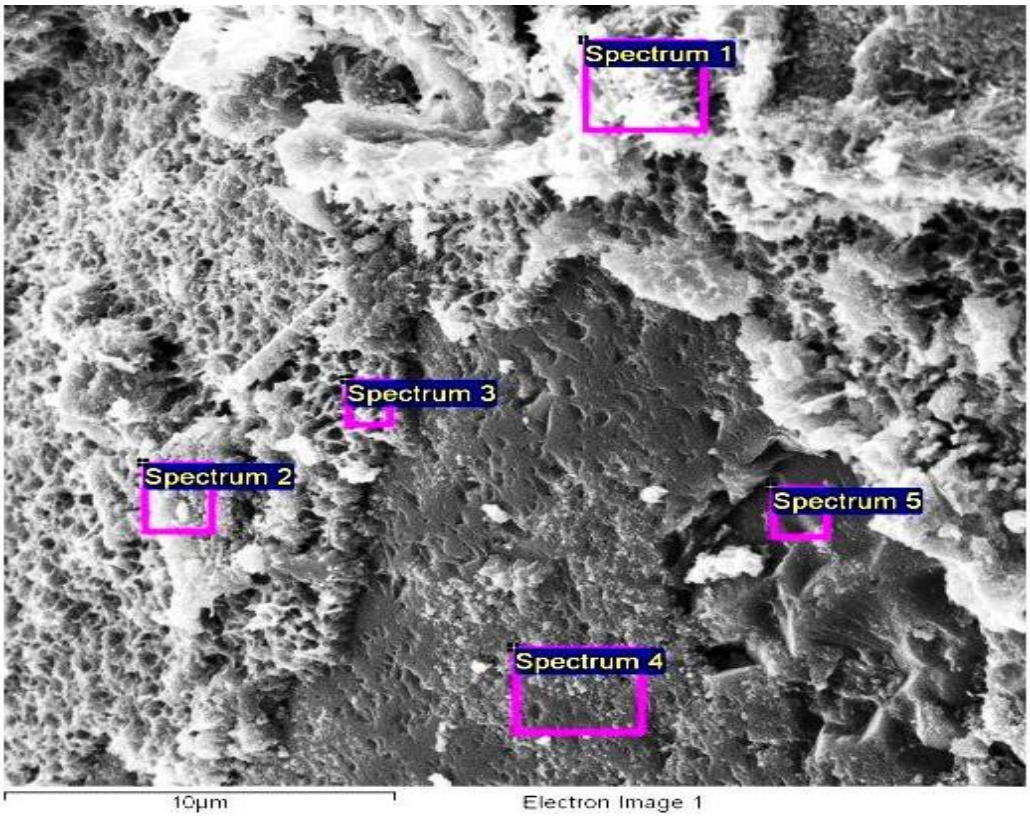
За розрахунками співвідношення оксиду кальцію до оксиду кремнію в першому дослідженому зразку складає 2,55, що задовольняє вимогам стандарту (рис. 2). Трикальцієвий алюмінат у складі цементу не повинен перевищувати 8 % за масою. У бетоні кількість трикальцієвого алюмінату складає 5,85 % (мас.). Кількість оксиду магнію дорівнює 0,17 % (мас.), що набагато менше граничної кількості у 5 % (мас.). Кількість глин дорівнює 6,6 % (мас.), що не задовольняє вимогам стандарту.

Середнє значення концентрації оксиду сірки складає 4,93 % (мас.). Має місце локальне підвищення концентрації її оксиду до 6,15 % (мас.), що значно перевищує нормативний показник у 3,5 % (мас.).

Крім того, значний відсоток вуглецю в структурі цементного каменю усіх зразків свідчить про його карбонізацію, що додатково знижує механічні характеристики бетону в конструкціях мосту. Але точність визначення концентрації вуглецю є дуже низькою і тому ретельний аналіз ступеню карбонізації не проводили. Із загальної практики використання бетону швидкість карбонізації складає 20 мм за 25 років. Для захисту бетону від карбонізації застосовують спеціальні добавки.

Другий зразок бетону був відібраний на ділянці пошкодженого бетону, що знаходився біля пішохідної частини мосту. Для зазначенго бетону характерно нормаивне співвідношення оксидів кальцію та кремнію k=7,02, вміст оксиду сірки SO_3- 0,62 % (мас.), глин 1,02 % (мас.), коефіцієнт приведеної лужності цементу 0,18 % (мас.), відсутність з'єднань магнію, але має місце наявність іонів фтору в кількості 0,71 % (мас.). Цей хімічний елемент називають отрутою для бетонів, бо він сприяє розм'якшенню цементного каменю та мінеральних гелів всередині бетону, разом із кремнієм та натрієм утворює гелеподібні і стрічкоподібні кристалічні структури, що руйнують бетон з середини протягом року.

Наступний зразок відібраний із тріщини на опорній конструкції мосту. Цементний камінь зазначеної ділянки бетону має нормативні показники співвідношення оксидів кальцію та кремнію 3,73, концентрація оксиду магнію дорівнює 0,28 % (мас.), концентрація трикальцієвого алюмінату дорівнює 1,47 % (мас.), оксиду сірки SO_3- 0,21 % (мас.), глин – 0,75 % (мас.).



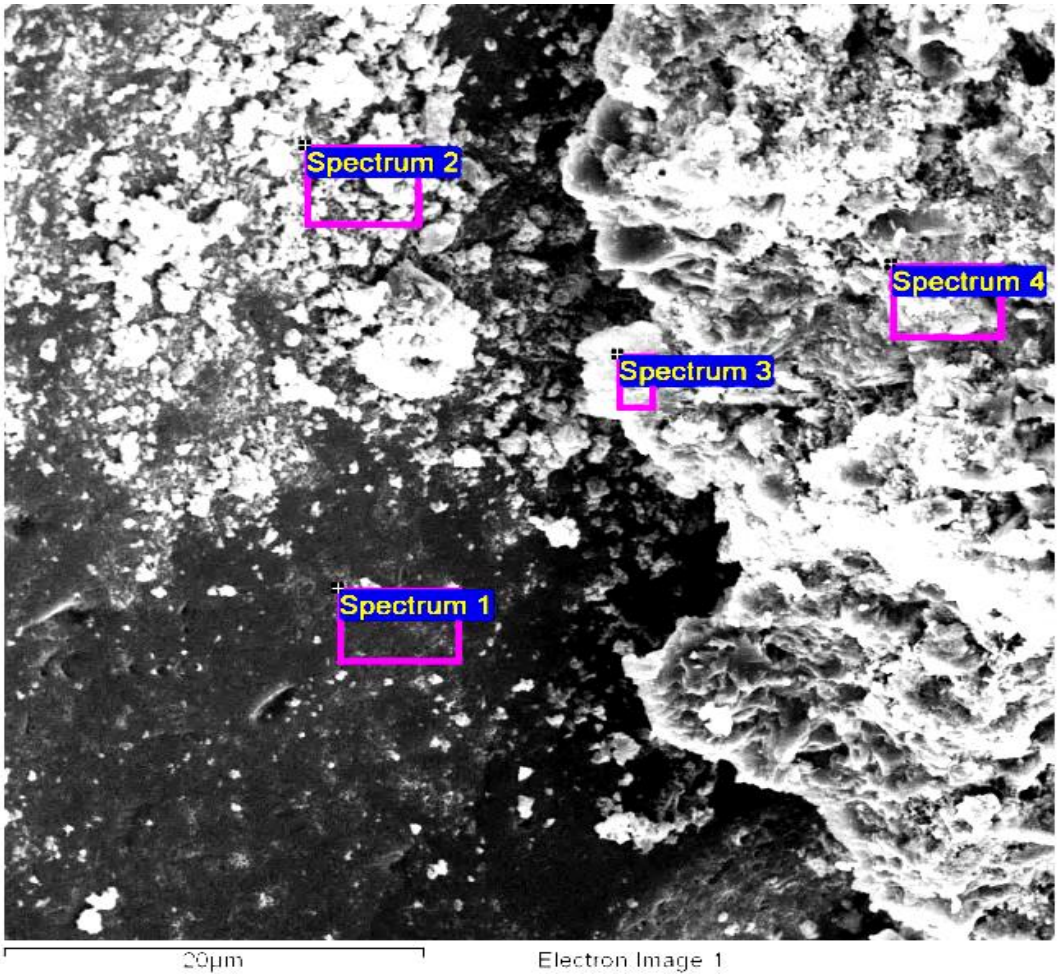
Spectrum	In stats.	C	O	F	Na	Al	Si	S	Ca	Total
Spectrum 1	Yes	16.40	52.93	1.21	0.20	0.81	5.94	0.46	22.04	100.00
Spectrum 2	Yes	16.96	54.47	1.37	0.00	0.54	4.10	0.38	22.17	100.00
Spectrum 3	Yes	18.40	52.36	0.98	0.14		7.86	0.41	19.85	100.00
Spectrum 4	Yes	11.03	57.92		0.00		29.27		1.77	100.00
Spectrum 5	Yes	9.54	57.13		0.00		31.95		1.38	100.00

Рисунок 2 – Мікроструктура та хімічний склад бетону, % (мас.), на границі цементний камінь–пісочна частка

Figure 2 – Microstructure and chemical composition of concrete, % (wt.), at the cement stone–sand particle boundary.

Середня приведена лужність бетону складає 1,7 %, що в 2,8 рази перевищує норму, до того ж в реакційній зоні приведена лужність складає 26,29 % (мас.), що в 43,82 рази перевищує нормативний показник і свідчить про активність корозійних процесів та неможливість їх припинення. До того ж бетон має середню концентрацію фтору 0,86 % (мас.) зі збільшенням концентрації в реакційній зоні до 1,04 % (мас.). Також він містить хлор із середньою концентрацією 0,13 % (мас.) і в реакційній зоні 0,21 % (мас.) (рис. 2). Усі зазначені галогени сприяють прискоренню процесу корозійного руйнування. І кінцевий термін втрати конструкції міцності не перевищує 1 рік від початку дії активаторів корозії - галогенів

На рис. 3 наведено межу пісочної частки з цементним каменем із кремнієвим гелем посередині, який демонструє процес корозії з продукуванням продукту реакції – мінеральним гелем.



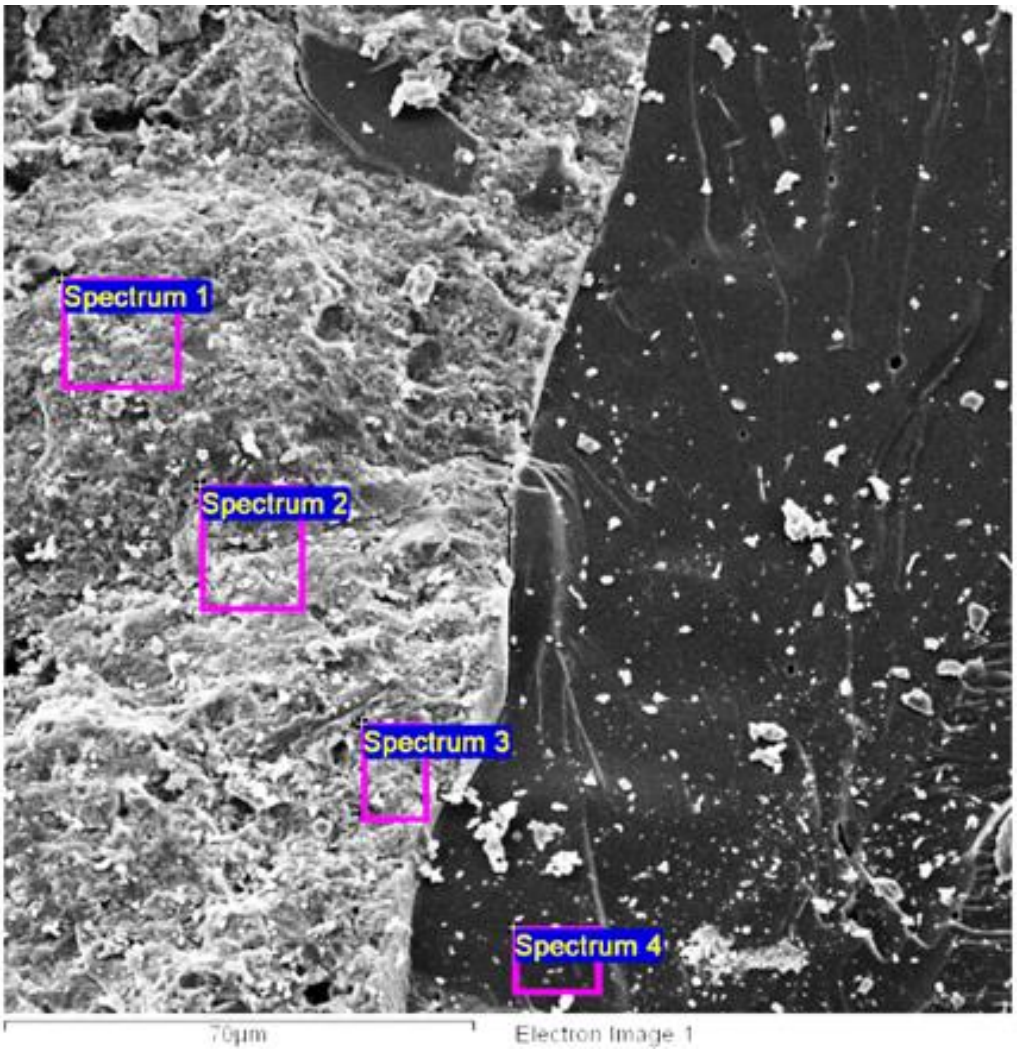
Spectrum	In stats.	C	O	F	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	10.10	56.46				32.51				0.92		100.0
Spectrum 2	Yes	15.99	53.63	1.48	0.23	1.04	23.49		0.47	0.52	3.15		100.0
Spectrum 3	Yes	16.09	54.76	1.08	0.99	6.00	10.29	0.33	1.47	0.85	8.13		100.0
Spectrum 4	Yes	17.17	55.37	1.02	0.44	1.65	4.94	0.30	0.64		16.41	2.07	100.0

Рисунок 3 – Мікроструктура та хімічний склад бетону, % (мас.) ,
на границі цементний камінь/пісочна частка.

Figure 3 – Microstructure and chemical composition of concrete, % (wt.),
at the cement stone/sand particle boundary.

У зоні тріщини підвищена кількість глин 10,96 % (мас.) та трикальцієвого алюмінату 8,5 % (мас.), а також значна концентрація галогенів фтору і хлору 1,19 % (мас.) і 0,86 % (мас.) відповідно.

Із зони непошкодженого бетону отримано наступний зразок для досліджень (рис. 4). Бетон має задовільне співвідношення оксидів кальцію та кремнію, що дорівнює k=2,69. Кількість триоксиду сірки дорівнює 1,22 % (мас), трикальцієвий алюмінат (6,11 % (мас.)) і кількість глин (1,2 % (мас.)) не виходять за рамки дозволених стандартом концентрацій.



Spectrum	In stats.	C	O	F	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Total
Spectrum 1	Yes	11.28	42.31		1.01	1.39	6.77	0.53	0.00	1.69	35.02	100.0
Spectrum 2	Yes	13.40	49.06		1.64	0.96	9.76	0.44	0.00		24.73	100.0
Spectrum 3	Yes	10.03	47.36	0.86	1.64	1.02	5.92	0.74	0.00		32.43	100.0
Spectrum 4	Yes	12.30	40.35				47.09	0.00	0.26			100.0

Рисунок 4 – Хімічний склад та мікроструктура структурних складових бетону на непошкодженій ділянці, % (мас.)
Figure 4 – Chemical composition and microstructure of structural components of concrete in the undamaged area, % (wt.)

Середня приведена лужність цементу перевищує нормативні показники в 10,88 раз і становить 6,53 % (мас.). Зазначені обставини у поєднанні з підвищеним вмістом галогенів в реакційній зоні

(фтору - 0,86 % (мас.), та хлору 0,26 % (мас.) дозволяють робити висновок про подальше інтенсивне корозійне руйнування бетону до втрати міцності протягом до одного року (рис.4).

Із проведених досліджень встановлено, що для попередження передчасного руйнування бетону інфраструктурних об'єктів необхідно: проводити моніторинг якості бетону існуючих конструкцій та під час будівництва нових об'єктів за експрес-методикою мікроструктурного аналізу за вимогами ДСТУ Б В. 2.6-145: 010. При цьому для наочного спостереження за швидкістю корозійних процесів пропонуємо встановити гіпсовий маяк на тріщину на опорній колонні мосту з боку тротуару.

З метою усунення активного впливу галогенів на структурні перетворення в бетоні, що експлуатується пропонуємо дослідити можливість використання менш агресивних речовин, що менше впливатимуть на корозійні процеси у бетоні і арматурі залізобетонних споруд, але ефективно будуть сприяти очищенню тротуарів та проїзної частини доріг від снігу.

Висновки. За результатами дослідження цементного каменю в конструкціях прогонової будови та опорної арочної колони мосту через р. Либідь по проспекту Повітряних сил України в м. Київ можна зробити наступні висновки:

1. Проведені в роботі дослідження показали невідповідність за реакційною спроможністю цементу та піску досліджуваного бетону вимогам стандартів України.

2. Прогонові та опорні конструкції мосту в яких проходить лужно-кремнієвокисла реакція необхідно міняти на нові. Так як, будь-які ремонтні матеріали, що можуть бути нанесені на масив бетону будуть розриватися з причини реструктуризаційних процесів в середині бетону.

3. Наявність підвищеної приведеної лужності цементу призводить до лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні, що експлуатується. Чим більш реакційно спроможний хімічний елемент знаходиться в бетоні, тим активніше проходить лужно-кремнієвокисла реакція, яка руйнує бетон з середини. Агресивними реагентами - каталізаторами лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні є речовини з вмістом галогенів.

4. Швидкість реакції корозії цементного каменю залежить від наявності агресивних реагентів всередині бетону.

5. У випадку дослідженого бетону необхідно відмітити, що поєднання підвищених концентрацій фтору та хлору сприяє максимальній швидкості зазначеної реакції. Реакція проходить з утворенням нових фаз із вторинного етрингіту, гелевих прошарків, які згодом кристалізуються. Питомий об'єм кристалів перевищує наявний внутрішній об'єм пустот і сприяє утворенню мікро- та згодом макротріщин в бетонній матриці, по-перше, по границях заповнювач–цементний камінь.

Перелік посилань

1. Zhang Y. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO_2 corrosion in ultra-high temperature sour gas wells Yihan Zhang, Mingbiao Xu, Jianjian Song, Chunli Wang , Xiaoliang Wang, Bahati Adnan Hamad Construction and building materials,Vol. 323, March 14, 2022, 125879 https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125879.

2. Cheng X.W. Study of interface structure during unidirectional corrosion of oil well cement in H2S based on computed tomography technology XiaoWei Cheng, KaiYuan Mei, ZaoYuan Li, Xingguo Zhang, XiaoYang Guo Research in Industrial and Engineering Chemistry,Vol. 55/Issue 41, https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b02162.

3. 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).

4. Пшінько О.М., Рунова Р.Ф. Рунова Р.Ф., Руденко І.І., Троян В.В. Роль добавок у зменшенні клінкерної складової під час виробництва товарних бетонних сумішей // М-ли 10-й Міжн. науково-практ. конф. «Дні сучасного бетону». – Запоріжжя: «Планета», 2008. – С. 45 – 59.

5. Рунова Р.Ф., Руденко І. І., Троян В. В. Аналіз факторів, що визначають властивості товарних бетонних сумішей // Матеріали 1-ї Міжнародної науково-практичної конференції «ТОВАРНИЙ БЕТОН — НОВІ МОЖЛИВОСТІ У БУДІВЕЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ». – Харьків 2008. – С. 16-43.

6. Шейніч Л. О. Сучасні уявлення про корозію цементного каменю в бетоні під дією води Шейніч Л.О. Ю Колесник, К.К. Пушкарьова, Л.О. Шейнич Автошляховик України 2012 – № 4. – С. 33-37.

7. Рибкін В. В. Дослідження фізико-хімічних властивостей дрібних заповнювачів для виробництва залізобетонних шпал [Текст]/ В.В. Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О.Пшінько, В.П.Лисняк, Л.О.Яришкіна, С.В.Васильєва// Вісник ДНУЗТ Вип. 40 – Д.:В-во ДНУЗТ – С. 140-145.

8. Рибкін В. В. Дослідження експлуатаційної стійкості залізобетонних шпал та основні технологічні прийоми її покращення [Текст] / В.В.Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О.Пшінько, С.В.Коваленко, В.О.Яковлєв // Будівництво України. № 4 - К. – 2011 – С.19-23.

9. Рибкін В. В. Деякі аспекти технологічних прийомів виробництва та контролю експлуатаційного ресурсу залізобетонних шпал в Україні та світі[Текст] / В.В.Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О. Пшінько, С.В.Коваленко, В.О.Яковлєв// Залізничний транспорт України № 3/4 – К. – 2012 – С. 76-81.

10.ДСТУ ISO 3696:2003 Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння; (ISO 3696:1987, IDT).

11.ДСТУ Б EN12620:2013 Заповнювачі для бетону (EN12620:2002+A1:2008, IDT).

12.ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови.

13.ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загально-будівельного призначення. Технічні умови.

14.ДСТУ Б В.2.7-71 -98 (ГОСТ 8269.0-97) Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань.

15.ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови.

16.ДСТУ Б В.2.7-210:2010 Будівельні матеріали. Пісок із відсівів дроблення виверженых гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови.

17.ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цементи. Чстина 1 Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197-1:2011, IDT).

18.ДСТУ 9183:22 Цементи. Загальні технічні умови.

19.ДСТУ EN 197-2:2023 (EN 197-2:2020,IDT) Цемент Частина 2 Оцінювання та перевірка стабільності експлуатаційних характеристик.

20.ДСТУ 8858:2019 Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній Технічні умови.

21.ДСТУ Б В.2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови (ГОСТ 23732-79, MOD);

22.ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Конструкції будинків і споруд. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови.

23.ДСТУ Б.А 1.1-55-94 Природні піски для виробництва будівельних матеріалів Терміни та визначення.

24.ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови.

25.ДСТУ Б В.2.7-176:2008 Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови.

26.ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.

27.ДСТУ Б В.2.7-224:2009 Бетони. Правила контролю міцності.

28.17. ДСТУ-Н Б А.1.1-83:2008 Система стандартизації та нормування у будівництві. Настанова. Керівний документ В щодо визначення контролю виробництва на підприємстві в технічних умовах на будівельні вироби.

29.ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008 Настанова щодо застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах.

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF CEMENT STONE CORROSION IN THE EMERGENCY DESTRUCTION OF THE DECK STRUCTURE OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE

Onyshchenko Artur, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Bridges and Tunnels National Transport University Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, tel.: +380687771899, http://orcid.org/0000-0002-1040-4530

Kovalenko Valentyna , Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine Omelyana Prytsaka (Kryzhizhanovskogo) str., 1, Kyiv, Ukraine, 03142, e-mail: vkovdp@gmail.com, tel.: +380504890772, https://orcid.org/0000-0002-1196-7730

Rykovtsev , 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

Kovalchuk Vitalii , Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Railway Transport Lviv Polytechnic National University S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: kovalchuk.diit@gmail.com, tel.: +380972237243, https://orcid.org/0000-0003-4350-1756

Summary. The work is dedicated to conducting research on the condition of the bridge structures of the Povitroflotsky Avenue bridge over the Lybid River in Kyiv. To achieve this, methods of rejected assessment of reinforced concrete structures of the bridge deck, as well as express techniques of microstructural, micro-X-ray spectroscopic, and fractographic analysis, were applied.

The aim of the work is to investigate and identify the causes of the emergency destruction of bridge structures over the Lybid River.

Object of study: the deck structures of the bridge.

As a result of the research, it was found that in the concrete composition, at the boundary of the sand aggregate and cement stone, there is an increased amount of alkaline metals and halogens, which exceeds the requirements of national standards several times.

It was established that the average concentration of sulfur oxide is 4.93 % (by weight). There is a local increase in the concentration of sulfur oxide to 6.15 % (by weight), which significantly exceeds the normative value of 3.5% (by weight). In addition, a significant percentage of carbon in the structure of cement stone in all samples indicates its carbonation, which further reduces the mechanical properties of the concrete in the bridge structures.

To prevent cases of premature destruction of concrete in bridges, overpasses, and highways, it is suggested to monitor the quality of concrete in existing structures and during the construction of new objects using the express method of microstructural analysis. Additionally, to visually monitor the speed of corrosion processes, a gypsum marker should be installed on a crack in the support column of the bridge from the side of the sidewalk.

To eliminate the active impact of halogens on structural transformations in operating concrete, it is recommended to investigate the possibility of using less aggressive substances that would have a smaller impact on corrosion processes in concrete and reinforcement in reinforced concrete structures but effectively contribute to cleaning sidewalks and roadways from snow.

Keywords: bridge deck structures, beam bridges, concrete, cement stone corrosion, microstructural analysis, micro-X-ray spectroscopic analysis, alkaline-silica reaction, emergency destruction, concrete durability forecasting.

References

1. Zhang Y. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO_2 corrosion in ultra-high temperature sour gas wells Yihan Zhang, Mingbiao Xu, Jianjian Song, Chunli Wang , Xiaoliang Wang, Bahati Adnan Hamad Construction and building materials,Vol. 323, March 14, 2022, 125879 https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125879.

2. Cheng X.W. Study of interface structure during unidirectional corrosion of oil well cement in H2S based on computed tomography technology XiaoWei Cheng, KaiYuan Mei, ZaoYuan Li, Xingguo Zhang, XiaoYang Guo Research in Industrial and Engineering Chemistry,Vol. 55/Issue 41, https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b02162.

3. DSTU B V. 2.6-145:2010 Konstruktsiyi budynkiv i sporud. Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruktsiy vid koroziyi. Zahalni tekhnichni vymohy (HOST 31384-2008, (NEQ).

4. Pshinko O.M., Runova R.F. Runova R.F., Rudenko Y.Y., Troyan V.V. Rol dobavok v umenshenyy klynkernoy sostavlyayushchey pry proyzvodstve tovarnykh betonnykh smesey// Mat. 10-y Mezhd. nauchno-prakt. konf. «Dny sovremennoho betona». – Zaporozhe: «Planeta», 2008. – s. 45 – 59.

5. Runova R.F., Rudenko Y.Y., Troyan V.V. Analyz faktorov, opredelyayushchykh svoystva tovarnykh betonnykh smesey// Materyaly 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyy «TOVARNY BETON — NOVYE VOZMOZhNOSTY V STROYTELNYKh TEKHNOLOHYYAKH».- Kharkov 2008. - S.16-43.

6. Sheynich L.O. Suchasni uyavlennya pro koroziyu tsementnoho kamenyu v betoni pid diyeyu vody Sheynich L.O. Yu Kolesnyk, KK Pushkarova, LO Sheynych Avtoshlyakhovyk Ukrayiny 2012 № 4, s. 33-37.

7. Rybkin V.V. Doslidzhennya fizyko-khimichnykh vlastyvostey dribnykh zapovnyuvachiv dlya vyrobnytstva zalizobetonnykh shpal [Tekst]/ V.V. Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O.Pshinko, V.P.Lysnyak, L.O.Yaryshkina, S.V.Vasylyeva// Visnyk DNUZT Vyp. 40 – D.:V-vo DNUZT – S. 140-145.

8. Rybkin V.V. Doslidzhennya ekspluatatsiynoyi stiykosti zalizobetonnykh shpal ta osnovni tekhnolohichni pryyomy yiyi pokrashchennya [Tekst]/ V.V.Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O.Pshinko, S.V.Kovalenko, V.O.Yakovlyev//Budivnytstvo Ukrayiny. № 4 - K. – 2011 – S.19-23.

9. Rybkin V.V. Deyaki aspekty tekhnolohichnykh pryyomiv vyrobnytstva ta kontrolyu ekspluatatsiynoho resursu zalizobetonnykh shpal v Ukrayini ta sviti[Tekst]/ V.V.Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O. Pshinko, S.V.Kovalenko, V.O.Yakovlyev// Zaliznychnyy transport Ukrayiny № 3/4 – K. – 2012 – S. 76-81.

10.DSTU ISO 3696:2003 Voda dlya zastosuvannya v laboratoriyakh. Vymohy ta metody pereviryannya; (ISO 3696:1987, IDT).

11.DSTU B EN12620:2013 Zapovnyuvachi dlya betonu (EN12620:2002+A1:2008, IDT).

12.DSTU B V.2.7-32-95 Budivelni materialy. Pisok shchilnyy pryrodnyy dlya budivelnykh materialiv, vyrobiv, konstruktsiy i robit. Tekhnichni umovy.

13.DSTU B V.2.7-46:2010 Budivelni materialy. Tsementy zahalno-budivelnoho pryznachennya. Tekhnichni umovy.

14.DSTU B V.2.7-71 -98 (HOST 8269.0-97) Budivelni materialy. Shchebin i hraviy iz shchilnykh hirskykh porid i vidkhodiv promyslovoho vyrobnytstva dlya budivelnykh robit. Metody fizyko-mekhanichnykh vyprobuvan.

15.DSTU B V.2.7-75-98 Budivelni materialy. Shchebin i hraviy shchilni pryrodni dlya budivelnykh materialiv, vyrobiv, konstruktsiy ta robit. Tekhnichni umovy.

16.DSTU B V.2.7-210:2010 Budivelni materialy. Pisok iz vidsiviv droblennya vyverzhenykh hirskykh porid dlya budivelnykh robit. Tekhnichni umovy.

17.DSTU B EN 197-1:2015 Tsementy. Chstyna 1 Sklad, tekhnichni umovy ta kryteriyi vidpovidnosti dlya zvychaynykh tsementiv (EN 197-1:2011, IDT).

18.DSTU 9183:22 Tsementy. Zahalni tekhnichni umovy.

19.DSTU EN 197-2:2023 (EN 197-2:2020,IDT) Tsement Chastyna 2. Otsinyuvannya ta perevirka stabilnosti ekspluatatsiynykh kharakterystyk.

20.DSTU 8858:2019 Sumishi tsementobetonni dorozhni ta tsementobeton dorozhniy Tekhnichni umovy.

21.DSTU B V.2.7-273:2011 Voda dlya betoniv i rozchyniv. Tekhnichni umovy (HOST 23732-79, MOD).

22.DSTU B V.2.6-209:2016 Konstruktsiyi budynkiv i sporud. Shpaly zalizobetonni poperedno napruzheni dlya zaliznyts koliyi 1520 i 1435 mm. Tekhnichni umovy.

23.DSTU B.A 1.1-55-94 Pryrodni pisky dlya vyrobnytstva budivelnykh materialiv Terminy ta vyznachennya.

24.DSTU B V.2.7-171:2008 Budivelni materialy. Dobavky dlya betoniv i budivelnykh rozchyniv. Zahalni tekhnichni umovy.

25.DSTU B V.2.7-176:2008 Sumishi betonni ta beton. Zahalni tekhnichni umovy;.

26.DSTU B V.2.7-214:2009 Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy.

27.DSTU B V.2.7-224:2009 Betony. Pravyla kontrolyu mitsnosti.

28. DSTU-N B A.1.1-83:2008 Systema standartyzatsiyi ta normuvannya u budivnytstvi. Nastanova. Kerivnyy dokument V shchodo vyznachennya kontrolyu vyrobnytstva na pidpryyemstvi v tekhnichnykh umovakh na budivelni vyroby.

29.DSTU-N B V.2.7-175:2008 Nastanova shchodo zastosuvannya khimichnykh dobavok u betonakh i budivelnykh rozchynakh.Pshinko O.M., Runova R.F., Rudenko I.I., Troyan V.V. The role of additives in reducing the clinker component in the production of ready-mix concrete mixes// Proc. of the 10th Int. scientific-practical. conf. "Days of modern concrete". - Zaporozhye: "Planeta", 2008. - pp. 45 - 59.

УДК 625.85:502.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-093-103**
UDC 625.85:502.3

ЕКОЛОГІЗАЦІЯ АСФАЛЬТОБЕТОНУ: ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ДОБАВКИ, МЕНШІ ТЕМПЕРАТУРИ ТА МІНІМІЗАЦІЯ CO_2

ECOLOGIZATION OF ASPHALT CONCRETE: ENERGY-SAVING ADDITIVES, LOWER TEMPERATURES, AND CO_2 MINIMIZATION



***Парфенов Сергій Сергійович**, аспірант кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет*
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010
e-mail: sergey.parfyonov.dp@gmail.com

https://orcid.org/0009-0001-6003-1613

Анотація. У статті розглянуто шляхи екологізації технології виробництва та укладання асфальтобетону шляхом застосування енергозберігаючих добавок, що дозволяють працювати при нижчих температурах, з метою зменшення споживання енергії та викидів CO_2. Наведено аналіз сучасних підходів до так званих «теплих асфальтобетонів», які забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики дорожнього покриття за температур приготування на 30–40 °С нижчих, ніж у традиційних гарячих сумішей. У рамках дослідження представлено практичний кейс укладання теплого асфальтобетону на об'єкті по вул. Вербовій, де використано спеціальну добавку для зниження температури. Оцінено результати впровадження: технологічні показники ущільнення, фізико-механічні характеристики покриття, економія палива та скорочення викидів парникових газів. Показано, що використання енергозберігаючих технологій в асфальтобетоні дозволяє суттєво зменшити енергозатрати і негативний вплив на довкілля без погіршення якості дорожнього покриття. Зроблено висновки про економічну та екологічну ефективність технології, а також окреслено перспективи її широкого впровадження в дорожньому господарстві.

Ключові слова: теплий асфальтобетон, енергозберігаюча добавка, знижена температура, викиди CO_2, економія енергії, екологічна ефективність, дорожнє будівництво.

Вступ. Дорожнє будівництво традиційно належить до матеріало- та енергомістких галузей. Виробництво асфальтобетонних сумішей для верхніх шарів покриття потребує нагрівання мінеральних матеріалів і бітумного в'яжучого до високих температур (зазвичай 150–180 °С), що супроводжується значними витратами палива і викидами парникових газів. Відомо, що саме процеси сушіння та нагрівання матеріалів у асфальтозмішувальних установках є основним джерелом викидів CO_2 при виробництві дорожніх покриттів. На тлі сучасних вимог щодо зменшення вуглецевого сліду та боротьби зі зміною клімату питання зниження енерговитрат у дорожньому господарстві набуває особливої актуальності. Одним з напрямів вирішення цієї проблеми є так звана екологізація асфальтобетону – впровадження технологій і матеріалів, що дозволяють зменшити шкідливий вплив на довкілля при збереженні або покращенні експлуатаційних характеристик покриття. Зокрема, усе більшої уваги набувають **теплі асфальтобетонні суміші** (ТАБ) – технології, які дають змогу істотно знизити температуру виготовлення та укладання асфальтобетону.

У практиці зарубіжних країн уже накопичено значний досвід застосування технологій теплого асфальтобетону. За останні роки у багатьох державах частка таких сумішей стрімко зросла завдяки їх екологічним та економічним перевагам. Наприклад, зниження температури на ~30 °С дозволяє

заощадити 20–30% палива, що прямо зменшує викиди CO_2 на аналогічну величину. Крім того, менша температура призводить до зменшення утворення парів бітуму і аерозолів на асфальтних заводах та будівельних майданчиках, покращуючи умови праці робітників і довкілля поблизу доріг. Все це стимулює пошук та впровадження нових рішень для екологізації асфальтобетону і в Україні.

Одна з розробок у цій сфері – вітчизняна рідка енергозберігаюча добавка ТМ «VELETON», що створена для зниження робочої температури асфальтобетону та підвищення його якості. Важливо зазначити, що ранні покоління хімічних добавок мали й недоліки. Дослідження показували, що деякі рідкі реагенти для зниження температури призводили до зменшення міцності асфальтобетону при стиску, що неприйнятно для важких покриттів. Це породило сумніви щодо доцільності їх застосування. Натомість сучасні добавки рідкі енергозберігаючі добавки на основі синтетичних полімерів позбавлені цього недоліку: вони знижують в'язкість бітуму при високих температурах, але навпаки підвищують міцність і стійкість асфальтобетону після охолодження. В даній роботі проаналізовано принцип дії та ефективність енергозберігаючої добавки нового покоління на прикладі продукту ТМ «VELETON», а також оцінено економічні, технологічні й екологічні аспекти її використання.

Постановка проблеми. Основна проблема, на яку спрямовано дане дослідження, полягає у високому рівні енергоспоживання та забруднення довкілля при традиційних технологіях виробництва асфальтобетону. Випалювання палива для нагрівання сумішей спричиняє значні викиди CO_2, CO, NO_x та дрібнодисперсних часток, що негативно впливають на атмосферу та здоров'я людей. При цьому дорожні організації стикаються з необхідністю дотримання екологічних нормативів і одночасно – забезпечення якості та довговічності покриттів. Проблема полягає в пошуку балансу між технологічною ефективністю та екологічною безпечністю: як знизити температуру приготування асфальтобетону і мінімізувати викиди, не жертвуючи міцністю, зчепленням та довговічністю дорожнього одягу. На часі є розробка та впровадження таких технологічних рішень, які б дозволили модернізувати існуючі асфальтобетонні заводи та процес укладання сумішей під нові екологічні вимоги. Потребує вирішення також питання економічної доцільності: наскільки впровадження енергозберігаючих добавок виправдане з точки зору затрат і які від цього вигоди в короткостроковій та довгостроковій перспективі. Таким чином, постала необхідність комплексного дослідження технології теплого асфальтобетону – від лабораторного аналізу та пілотного впровадження до оцінки отриманих результатів.

Мета дослідження. Метою даної роботи є підвищення екологічності та енергоефективності асфальтобетону шляхом зниження технологічних температур при його виробництві та укладанні. Для досягнення цієї мети ставляться такі завдання: 1) проаналізувати сучасні методи зниження температури приготування асфальтобетонних сумішей, зокрема з використанням спеціальних енергозберігаючих добавок; 2) експериментально перевірити ефективність одного з таких методів на реальному дорожньому об'єкті, оцінивши технологічні та експлуатаційні показники теплого асфальтобетону; 3) визначити економічний ефект від зменшення витрат палива та екологічний ефект у вигляді скорочення викидів CO_2; 4) сформулювати рекомендації щодо широкого впровадження технології теплого асфальтобетону в дорожньо-будівельну практику. Таким чином, дослідження має довести, що екологізація асфальтобетону не лише можлива, але й раціонально обґрунтована за сукупністю показників.

Огляд сучасних методів енергозбереження. Сьогодні у світі використовуються різні підходи до зниження температур виробництва асфальтобетону. Сукупність таких технологій відома під назвою **"теплий асфальтобетон"**. До неї входять: - *Хімічні добавки (поверхнево-активні речовини).* Спеціальні домішки, що вводяться у бітум або безпосередньо в асфальтобетонну суміш, дозволяють знизити в'язкість бітуму при робочих температурах. Вони покращують змочування та обволікання зерен щебеню бітумним в'яжучим навіть при нижчій температурі, тим самим забезпечуючи достатню працювання суміші. Прикладами є добавки на основі фосфорних ефірів рослинних олій, жирних амінів тощо. Такі добавки одночасно виконують роль адгезійних присадок, підвищуючи зчеплення бітуму з мінеральними матеріалами і перешкоджаючи утворенню дефектів від дії води. Дозування хімічних енергозберігаючих добавок зазвичай становить 0,2–0,5% від маси бітуму. В результаті температура

приготування та укладання може бути зменшена на 20–40 °С залежно від типу добавки та властивостей бітуму.

Органічні воскові добавки. Це спеціальні синтетичні воски (на основі довголанцюгових вуглеводнів), що змішуються з бітумом. Вони плавляться при температурі близько 100 °С і роблять бітум більш текучим під час укладання. Поширеною є технологія модифікації бітуму синтетичним воском за ДСТУ-Н Б В.2.7-303:2015 – при отриманні так званого бітуму, модифікованого воском. Додавання ~3–4% воску від маси бітуму дозволяє знизити робочу температуру асфальтобетону на 30 °С і більше. Після охолодження воскова добавка твердне, навіть підвищуючи твердість і колієстійкість покриття. Воскові модифікатори добре зарекомендували себе для сумішей, що укладаються тонкими шарами, та для підвищення термостійкості покриттів.

Технологія спінення бітуму (піноутворення). Зниження в'язкості бітумного в'яжучого може досягатися за рахунок фізичного спінення. Існують системи впорскування води у перегрітий бітум у змішувачі: вода миттєво перетворюється на пару, утворюючи множинні бульбашки в бітумі, тимчасово збільшуючи його об'єм і знижуючи в'язкість. Інший підхід – додавання твердого піноутворювача, наприклад, цеоліту, який містить кристалізаційну воду: при температурі ~100–120 °С ця вода поступово виділяється, спінюючи бітум. Спінений бітум здатний рівномірно обволікати заповнювач при нижчих температурах (120–130 °С) і забезпечувати потрібне ущільнення. Перевага методу – він не потребує складних хімічних реагентів, але для дозованого впорскування води необхідна модернізація змішувача на АБЗ.

Застосування бітумних емульсій та холодних сумішей. Хоча це окрема група технологій, варто згадати, що використання бітумної емульсії замість розігрітого бітуму дозволяє взагалі уникнути нагрівання при приготуванні суміші. Холодні асфальтобетонні суміші (на основі емульсій) використовуються переважно для ямкового ремонту та тонкошарових покриттів. Вони мають обмежену міцність і довше тверднуть, проте є вкрай енергозберігаючими (практично нульові витрати палива на виробництво) і мінімізують викиди. У контексті магістральних доріг емульсійні технології застосовуються у вигляді поверхневих обробок, сларі-сіл тощо. Їх можна розглядати як частину комплексу заходів з екологізації дорожнього будівництва.

Таким чином, сучасні методи енергозбереження при виробництві асфальтобетону охоплюють як хімічні, так і фізичні способи зниження температури. Багато з них вже стандартизовані: наприклад, в Україні діють нормативні документи ДСТУ-Н Б В.2.7-315:2016, які встановляють виробництво та застосування асфальтобетонних сумішей за знижених температур з енергозберігаючими добавками. Ці методи дозволяють отримати теплі суміші, що за показниками міцності, щільності й довговічності не поступаються традиційним гарячим сумішам, але потребують менше енергії.

Принцип дії та властивості досліджуваної добавки. Енергозберігаюча добавка ТМ «VELETON» являє собою спеціальний модифікатор бітуму, що вводиться на асфальтному заводі для отримання *«***теплої***»* асфальтобетонної суміші. Добавка в стандартних умовах дозується в кількості ~1% від маси бітуму і додається до бітуму, розігрітого до ~150–160 °С, за ~30 хв до змішування з мінеральними матеріалами. Протягом цього часу компонент рівномірно розподіляється в бітумі. За рахунок унікального складу (масляні розчинники, полімерні та фосфатні сполуки тощо) дана добавка знижує в'язкість бітуму при робочих температурах і підвищує його пластичність (дуктильність).

Це полегшує обволікання бітумом мінерального матеріалу при нижчих температурах та покращує технологічність суміші. Крім того, добавка уповільнює процес старіння бітуму – леткі фракції менше випаровуються, завдяки чому зберігаються еластичні властивості зв'язуючого[15].

В результаті модифікації бітуму енергозберігаючою добавкою суттєво покращуються властивості асфальтобетонної суміші. По-перше, робочу температуру суміші на АБЗ вдається знизити орієнтовно на 30–40 °С (наприклад, з 170 °С до ~130 °С) без втрати якості ущільнення. Відповідно, зменшується і мінімально необхідна температура укладання – суміш залишається достатньо пластичною для ущільнення при більш низьких температурах навколишнього середовища. За певних умов технологія дозволяє ефективно укочувати суміш навіть при морозі до –10 °С, що раніше було

неможливим для звичайного гарячого асфальтобетону.

По-друге, поліпшується структура затверділого асфальтобетону: залишкова пористість суміші зменшується на 80–90% (з ~3,1% до ~1,7%), водонасичення – на 10–15%. Це означає, що покриття стає більш щільним, водонепроникним і довговічним. Зниження пористості та збереження еластичності бітуму сприяють підвищенню тріщиностійкості та опору колієутворенню – покриття менше тріскається в холодну погоду і менше деформується під дією транспорту. Також відзначено зростання коефіцієнта ущільнення суміші, тобто досягається вища щільність при тому ж каткуванні. У сукупності ці ефекти покращують якість та несучу здатність дорожнього одягу.

Економічна ефективність застосування. Найочевиднішим результатом впровадження технології теплого асфальтобетону є пряма економія енергоресурсів при виготовленні суміші. Зниження температури нагрівання матеріалів на кожні 10 °С дає орієнтовно 5–6% економії палива. Так, при зменшенні температури змішування на 30 °С (наприклад, зі 160 °С до 130 °С) витрати палива на АБЗ скорочуються приблизно на **15–20%**, що еквівалентно ~1-2 л дизельного палива на тонну суміші. У виробничих умовах отримані результати підтверджуються: за даними досліджень NAPA (США), зниження температури асфальтобетону в середньому на 30 °С забезпечило зменшення витрати палива на **20,4%**. Якщо врахувати, що типовий асфальтозавод витрачає 7-10 літрів мазуту або дизпалива на тонну ГАБ, то економія при використанні добавки є суттєвою.

Приклад розрахунку: для виробництва 1000 т асфальтобетону за традиційною технологією потрібно близько 7 000–7 500 л палива. Зниження робочої температури на ~20% дозволить зекономити ~1 400–1 500 л, що при поточних цінах на паливо дає значну суму заощаджень. Отже, застосування енергозберігаючої добавки прямо зменшує собівартість гарячого асфальтобетону за рахунок меншого споживання газу чи пального на підігрів матеріалів.

Крім безпосереднього скорочення енерговитрат, економічний ефект проявляється і опосередковано за рахунок оптимізації процесу укладання та подальшої експлуатації покриття. По-перше, зменшення в’язкості бітуму полегшує ущільнення суміші, що прискорює виконання дорожніх робіт. Дорожнє полотно з добавкою ущільнюється легше і потребує меншої кількості проходів котка. Це скорочує час укладання покриття на об’єкті, відповідно знижуються трудовитрати і витрати пального дорожніх машин (котків, асфальтоукладача) під час будівництва. По-друге, підвищення якості та довговічності покриття приносить значну економію на ремонтах. Щільний *«теплий»* асфальтобетон стійкіший до утворення тріщин і вибоїн, тому інтервали між ремонтами збільшуються.

Дорожня поверхня довше зберігає експлуатаційні характеристики, що дозволяє відтермінувати проведення дорогого капітального ремонту. За рахунок цього економляться кошти дорожніх служб і власників доріг у довгостроковій перспективі. Навіть коли потрібен ремонт, він носить менш затратний профілактичний характер, а не аварійний **ямковий ремонт**, який є лише тимчасовим усуненням дефектів. Зменшення потреби в частих ямкових ремонтах також знижує непрямі витрати, пов’язані з простоєм техніки та організацією трафіку на час ремонту. Таким чином, впровадження енергозберігаючої добавки дає комплексний економічний ефект: від скорочення витрат палива та часу укладання до зменшення витрат на утримання доріг протягом життєвого циклу.

Технологічна та експлуатаційні переваги. З точки зору організації дорожніх робіт, технологія теплого асфальтобетону підвищує гнучкість і надійність процесу. Завдяки додатку, *розширюється діапазон погодних умов* для виконання робіт: можна здійснювати укладання покриття при нижчих температурах повітря, в холодну пору року або при нестабільній погоді, коли звичайний гарячий асфальт охолов би надто швидко. Практичний досвід в країнах ЄС показує, що із застосуванням WMA-технологій якісне укочування сумішей можливе навіть при температурах повітря близьких до 0 °С. Наприклад, у Німеччині проводили укладання шарів асфальтобетону з використанням добавки Aspha-Min при температурі навколишнього середовища від –3 до +4 °С – при цьому температура суміші за укладальником становила лише 105–140 °С, а необхідна щільність покриття була досягнута меншим числом проходів котків, ніж для звичайної гарячої суміші. Даний результат демонструє, що енергозберігаючі добавки забезпечують **розширення будівельного сезону** – дорожні роботи можна виконувати пізньої осені або ранньою весною, не чекаючи тепла. Для України з її різкими перепадами

температур та обмеженим теплим сезоном це особливо актуально.

Також добавка дає змогу **збільшити радіус транспортування** асфальтобетонної суміші. Якщо без добавок відстань від АБЗ до місця укладання обмежується приблизно 50–60 км (щоб суміш не втратила тепло), то зі застосуванням теплого асфальтобетону цей радіус може бути значно більшим. Суміш, модифікована добавкою, повільніше остигає і довше зберігає достатню робочу температуру та пластичність. Відтак **ризики простою техніки** через передчасне охолодження суміші або її непридатність до укладання зменшуються. Будівельна бригада отримує більше часу на доставку та укладання матеріалу, що важливо при ремонті віддалених ділянок дороги. У підсумку підвищується надійність технологічного процесу: менше залежності від суворого дотримання температурного режиму, менше випадків, коли гарячий асфальт доводиться утилізувати через втрату температури.

Приклад практичного кейсу. Для перевірки ефективності технології теплого асфальтобетону в реальних умовах було обрано об’єкт влаштування покриття на вул. Вербовій у місті Київ, дослідне впровадження технології на ділянці автомобільної дороги протяжністю 1 км.

Перед початком укладання було підготовлено основу: старе покриття фрезерували на глибину 5 см, очистили від пилу та обробили бітумною емульсією (0,3 л/м²) як в’яжучим прошарком. Асфальтобетонну суміш виготовляли на стаціонарному асфальтозмішувальному заводі типу ДС-158, обладнаному для роботи в режимі знижених температур. За тиждень до виконання робіт було проведено лабораторний підбір складу теплої суміші: взято типову рецептуру щільного дрібнозернистого асфальтобетону типу А (для верхнього шару) з вмістом бітуму 5,2%. Асфальтобетон типу МЗ-А20 виготовлявся з додаванням 1% енергозберігаючої добавки.



Рисунок 1 – Додавання енергозберігаючої добавки та виготовлення суміші
Figure 1 – Addition of an energy-saving additive and production of the mixture

Робочу температуру суміші вдалося знизити з 170 °С до 140 °С (на 30 °С). Укладання проводилося при температурі повітря ~+5 °С ранньої осені. Попри прохолодні умови, ущільнення верхнього шару товщиною 6 см пройшло успішно – середня густина покриття склала 99% від лабораторної, що відповідало нормативним вимогам. Для досягнення такого результату знадобилося на 20% менше проходів котка, ніж зазвичай, що підтверджує покращену ущільнюваність суміші. Витрати палива на виготовлення 1 тонни асфальту зменшилися з ~7,5 до ~6,3 л, тобто економія склала ~1,2 л/т (близько 16%). Загалом на весь обсяг 800 тонн суміші було заощаджено близько **960 л дизпалива**, що еквівалентно ~45 тис. грн прямих витрат (за цінами сезону). Відповідно знизилися і шкідливі викиди: за оцінкою, в атмосферу викинуто на **2,5 тонни** CO_2 менше, ніж було б при

традиційній технології. Після зимового періоду експлуатації дослідна ділянка дороги перебуває в відмінному стані: не виявлено сітки дрібних тріщин, відсутні ознаки пластичних колій. Для порівняння, сусідня контрольна ділянка, відремонтована гарячим асфальтобетоном без добавок, має початкові прояви зносу (мікро-тріщини в колісних доріжках).



Рисунок 2 – Контроль температури навколишнього середовища і асфальтобетонної суміші
Figure 2 – Monitoring of the ambient temperature and the asphalt concrete mixture

Таким чином, реальний об’єкт показав, що застосування енергозберігаючої добавки забезпечує високу якість покриття при зниженій температурі укладання, даючи як негайний економічний ефект, так і потенційний виграш у довговічності. Отримані результати відповідають світовому досвіду впровадження технології теплого асфальту.

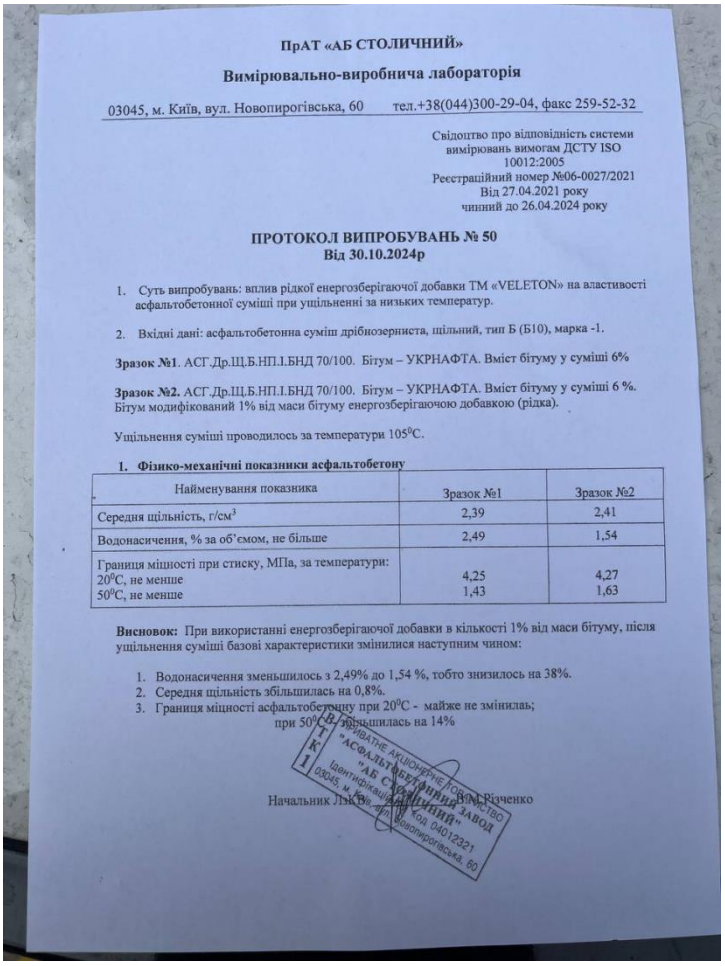
Застосоване рішення. Безпосередньо на об’єкті вул. Вербовій було реалізовано наступне технологічне рішення: виготовлення теплого асфальтобетону при температурі 130 °С з Енергозберігаюча добавка ТМ VELETON, транспортування суміші до місця укладки, влаштування шару 6 см і ущільнення. Асфальтобетон змішувався при температурі нагріву мінеральних матеріалів ~135 °С і введенні бітуму, розігрітого до 140 °С. Після додавання хімічної присадки вдалося досягти однорідного обволікання щебеню бітумом навіть при таких порівняно невисоких температурах. Температура суміші в самоскиді при прибутті на об’єкт (~20 км від заводу) склала 120 °С, що на 30–35 °С нижче, ніж зазвичай для гарячого асфальтобетону на аналогічну відстань. Укладання суміші велося асфальтоукладачем Vogele зі стандартними налаштуваннями (режим попереднього підігріву плити було знижено відповідно до меншої температури суміші). Під час ущільнення використовували два котки: важкий дорожній коток 12 т (статичний/вібро) та гумовий пневмоколісний коток ~25 т. Схема ущільнення не відрізнялася від типового для гарячого асфальтобетону: 2 проходи вібраційним котком по гарячому сліду, потім 3–4 проходи статично і доводка пневмоколісним котком для ліквідації пор. Завдяки застосованій добавці суміш залишалася достатньо технологічною: не спостерігалося ознак різкого охолодження чи втрати пластичності під час розподілу і першого проходу котка. Робітники відзначили майже повну відсутність інтенсивного димлення і запаху бітуму над укладальною смугою, що підтвердило зменшення випаровування в’яжучого при нижчій температурі.

Важливо, що паралельно на невеликій контрольній ділянці (50 м) уклали суміш без добавки (традиційний гарячий асфальтобетон) для порівняння. Це дало можливість зіставити характеристики ущільнення та якості покриття на наступних етапах.



Рисунок 3 – Влаштування дорожнього одягу з АБС виготовленого при знижених температурах і з використанням енергозберігаючої добавки

Figure 3 – Construction of a pavement structure using an asphalt concrete mixture produced at reduced temperatures with an energy-saving additive



ПрАТ «АБ СТОЛИЧНИЙ»

Вимірювально-виробнича лабораторія

03045, м. Київ, вул. Новопирогівська, 60 тел.+38(044)300-29-04, факс 259-52-32

Свідоцтво про відповідність системи вимірювань вимогам ДСТУ ISO 10012:2005
Реєстраційний номер №06-0027/2021
Від 27.04.2021 року
чинний до 26.04.2024 року

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ № 50
Від 30.10.2024р

1. Суть випробувань: вплив рідкої енергозберігаючої добавки ТМ «VELETON» на властивості асфальтобетонної суміші при ущільненні за низьких температур.
2. Вхідні дані: асфальтобетонна суміш дрібнозерниста, щільний, тип Б (Б10), марка -1.

Зразок №1. АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100. Бітум – УКРНАФТА. Вміст бітуму у суміші 6%

Зразок №2. АСГ.Др.Щ.Б.НП.І.БНД 70/100. Бітум – УКРНАФТА. Вміст бітуму у суміші 6 %. Бітум модифікований 1% від маси бітуму енергозберігаючою добавкою (рідка).

Ущільнення суміші проводилось за температури 105^{0}С.

1. Фізико-механічні показники асфальтобетону

Найменування показника	Зразок №1	Зразок №2
Середня щільність, г/см^3	2,39	2,41
Водонасичення, % за об'ємом, не більше	2,49	1,54
Границя міцності при стиску, МПа, за температури: 20^{0}С, не менше 50^{0}С, не менше	4,25 1,43	4,27 1,63

Висновок: При використанні енергозберігаючої добавки в кількості 1% від маси бітуму, після ущільнення суміші базові характеристики змінилися наступним чином:

1. Водонасичення зменшилось з 2,49% до 1,54 %, тобто знизилось на 38%.
2. Середня щільність збільшилась на 0,8%.
3. Границя міцності асфальтобетону при 20^{0}С - майже не змінилась; при 50^{0}С збільшилась на 14%

Начальник ЛВБ В.М.Різченко

Рисунок 4 – Результати випробувань

Figure 4 – Results of tests

Результати. Після завершення ущільнення теплого асфальтобетону на основній ділянці було відібрано керни (циліндричні зразки покриття діаметром 100 мм) для лабораторного аналізу. Для порівняння відібрали керни і з контрольної гарячої ділянки. Отримані результати показали, що впровадження технології знижених температур не погіршило фізико-механічних показників матеріалу. При використанні енергозберігаючої добавки в кількості 1% від маси бітуму, після ущільнення суміші базові характеристики змінилися наступним чином:

1. Водонасичення зменьшилось з 2,49% до 1,54 %, тобто знизилось на 38%.
2. Середня щільність збільшилась на 0,8%.
3. Границя міцності асфальтобетону при t=20°C майже не змінилась
4. Границя міцності асфальтобетону при t=50°C збільшилась на 14% з 1,43 МПа до 1,63 МПа

Поведінка покриття в процесі укладання та ущільнення також ретельно спостерігалася. Теплий асфальтобетон добре піддавався коткуванню; не було виявлено ознак перегріву або надмірної пластичності (які іноді трапляються у гарячих сумішей при занадто високій температурі). Фактично, ущільнюваність навіть покращилась: завдяки більш повільному остиганню (парадоксально, але суміш при 120 °C остигала повільніше, ніж гаряча при 160 °C, адже нижча початкова температура означає менший градієнт і повільнішу втрату тепла), у бригади було більше часу на ефективне коткування без ризику «переохолодити» суміш. В результаті отримано щільний і рівний шар покриття. Відразу після охолодження покриття візуально однорідне, колір дещо світліший, ніж у традиційного гарячого (через менше обвуглення бітуму).

Екологічні аспекти. Перехід від традиційного гарячого асфальтобетону до технології теплого асфальтобетону сприяє покращенню екологічної ситуації та умов праці дорожників. Найбільш прямий ефект – **зменшення викидів парникових газів**. Скорочення споживання палива на АБЗ на ~20% означає таке ж пропорційне зниження викидів CO_2 в атмосферу. За оцінками, виробництво 1 тонни гарячого асфальтобетону при 165 °C супроводжується викидом ~21,4 кг CO_2. Отже, зниження температури на 30 °C дозволяє зменшити цей показник приблизно до 17 кг/т. Польові вимірювання в США підтвердили, що при переході на WMA (температура суміші ~130 °C) концентрація CO_2 в димових газах зменшується в середньому на **22,3%**. Крім вуглекислого газу, істотно скорочуються і інші викиди з асфальтних установок – окиси азоту, оксид вуглецю, леткі органічні сполуки. Європейські дані свідчать, що сумарні викиди CO, NO_x, SO_2 можуть знизитися на 30–60% при впровадженні теплого асфальтобетону. Важливо відзначити різке зменшення викидів твердих часток та аерозолів бітуму, так званого «синього диму». Дослідження показали, що концентрація дрібнодисперсного бітумного аерозолю (PM_{10} і менше) при зниженні температури суміші на ~30 °C падає на **80–90%**. Фактично, при температурах нижче ~80 °C випаровування бітуму мінімальне, тож чим нижча температура приготування та укладання, тим менше шкідливих випарів потрапляє у повітря.

Для дорожніх працівників впровадження технології WMA означає **покращення умов праці та техніки безпеки**. Зменшення кількості бітумних парів і диму під час укладання покриття підвищує якість повітря на будівельному майданчику. Робітники менше піддаються впливу канцерогенних речовин, якими багаті пари бітуму при високих температурах. Так само нижча температура суміші означає менше теплове випромінювання від асфальту, що знижує ризик перегріву і теплового удару для персоналу влітку. Таким чином, *«теплий»* асфальтобетон є більш безпечним і комфортним з точки зору гігієни праці. В ширшому сенсі, екологічна перевага проявляється і в тому, що зниження температури виробництва дозволяє використовувати більшу кількість регенерованого асфальту (RAP) у суміші. Менше окиснення бітуму при нижчих температурах сприяє тому, що старий відфрезерований матеріал краще інтегрується в нову суміш. Це відкриває можливості для підвищення частки вторинних матеріалів, що зменшує потребу в нових нафтопродуктах і сприяє ресурсозбереженню. Отже, енергозберігаюча добавка забезпечує не лише економічний ефект, а й вписується в стратегію екологічно сталого розвитку, знижуючи вуглецевий слід дорожнього будівництва та експлуатації.

Загальний висновок. Результати проведеного дослідження підтвердили, що технологія теплого асфальтобетону є дієвим інструментом екологізації дорожнього будівництва. Використання

енергозберігаючих добавок дозволяє знизити робочу температуру приготування суміші приблизно на 30 °С, що приводить до значної економії паливно-енергетичних ресурсів та зменшення шкідливих викидів. На прикладі об'єкта по вул. Вербовій показано, що за умови правильного підбору рецептури і дотримання технології, теплий асфальтобетон нічим не поступається традиційному гарячому: покриття забезпечує необхідну щільність, міцність і водостійкість. Ба більше, у деяких аспектах спостерігаються переваги – менше старіння в'яжучого, краща стійкість до тріщиноутворення та вища екологічність процесу. Економічний аналіз продемонстрував, що додаткові витрати на спеціальні добавки компенсуються за рахунок економії палива та інших побічних вигод (швидше введення дороги в експлуатацію, менший знос обладнання). Таким чином, перехід на більш екологічні теплі суміші є не лише природоохоронною ініціативою, а й економічно доцільним кроком для дорожніх підприємств. Загальним висновком роботи є підтвердження гіпотези про те, що екологізація асфальтобетону через зниження температур – реальний шлях до зменшення карбонового сліду дорожнього господарства без втрати якості інфраструктури.

Перспективність впровадження. Технологія теплих асфальтобетонних сумішей має високий потенціал для широкого впровадження в Україні. Нині нормативна база вже частково підготовлена: діють державні стандарти і настанови, що регулюють використання енергозберігаючих добавок та знижених температур. Наступним кроком повинно стати масштабування пілотних проектів до рівня регіональних програм. Доцільно у найближчій перспективі включати вимогу застосування теплого асфальтобетону в тендерні умови на ремонти доріг місцевого значення, особливо у містах, де екологічний ефект є найбільш відчутним. Важливим фактором успіху є просвітницька робота з підрядними організаціями: необхідно проводити семінари, тренінги, демонстраційні укладання, щоб ознайомити інженерів та робітників з особливостями нової технології. Також перспективним напрямом є подальша науково-дослідна робота: зокрема, оптимізація складів теплих сумішей під різні кліматичні умови України, дослідження довговічності таких покриттів в реальних умовах руху (моніторинг через 1–3–5 років) та удосконалення доступних вітчизняних добавок для здешевлення технології. Необхідно відзначити, що світовий досвід продовжує накопичувати позитивні дані: у деяких країнах частка теплого асфальтобетону перевищує 50%, і це не впливає негативно на якість доріг. Україна має всі шанси перейняти ці найкращі практики. Враховуючи стратегічні цілі зі зменшення викидів парникових газів і економії енергії, стимулювання теплих технологій може отримати і державну підтримку (наприклад, у формі грантів або податкових пільг для підприємств, що впроваджують «зелені» інновації). Перспектива впровадження екологізованого асфальтобетону є надзвичайно актуальною і здатна суттєво підвищити сталий розвиток транспортної інфраструктури.

Висновки. 1. **Зниження температури виготовлення асфальтобетону є ефективним засобом енергозбереження.** Традиційні асфальтобетонні суміші вимагають високих температур (≈160 °С), що веде до значних витрат палива. Технології теплого асфальтобетону дозволяють зменшити температуру змішування і укладання на 20–40 °С, економлячи до 20–30% енергії. Це підтверджено як літературними даними, так і експериментально: в досліджуваному кейсі витрати палива знизилися приблизно на 19%.

Використання спеціальних добавок забезпечує необхідні властивості сумішей при нижчих температурах. Енергозберігаючі добавки знижують в'язкість бітуму та покращують обволікання заповнювача. В результаті теплова суміш має показники міцності, щільності і водостійкості на рівні з традиційною. Лабораторні і польові випробування (маршалл, ущільнення, водонасичення) показали мінімальну різницю між теплим і гарячим асфальтобетоном, а за деякими параметрами (адгезійна міцність, тріщиностійкість) теплий варіант навіть переважає завдяки меншому старінню в'яжучого.

Екологічний ефект від теплого асфальтобетону є значним. Зменшення споживання палива на кожну вироблену тонну суміші прямо пропорційно скорочує викиди CO_2. У випадку з покриттям на вул. Вербовій, за оцінками, вдалося зменшити викиди CO_2 приблизно на 0,7–0,8 т лише на одній ділянці 500 м. Одночасно різко скоротилися емісії бітумних парів і аерозолів (відсутність диму при укладанні). Це покращує умови праці та стан повітря для мешканців прилеглих територій. Отже, впровадження теплого асфальтобетону сприяє виконанню екологічних нормативів і зобов'язань у

галузі скорочення парникових викидів.

Економічна доцільність технології підтверджена розрахунками. Хоча застосування добавок дещо підвищує собівартість матеріалів, економія палива та супутні вигоди (швидше відкриття руху, менший знос техніки, можливість збільшити вміст РАП) компенсують ці витрати. На пілотному проекті економія на газі практично зрівноважила витрати на добавку. Для масштабніших проектів очікується чистий економічний виграш. Таким чином, технологія є конкурентоспроможною і не потребує значних додаткових витрат у довгостроковому періоді.

Рекомендовано широке впровадження теплих асфальтобетонних сумішей у дорожньому будівництві. Отримані результати і позитивний досвід дають підстави рекомендувати перехід на теплі технології при ремонтах та новому будівництві доріг різного значення. Необхідно актуалізувати будівельні норми та стандарти, включивши положення щодо теплого асфальтобетону, а також стимулювати підрядників до використання енергоефективних рішень. Перспективними напрямами є подальше дослідження довговічності таких покриттів у реальних умовах та удосконалення вітчизняних добавок. З огляду на отримані дані можна очікувати, що екологізація асфальтобетону через зниження температур буде відігравати значну роль у підвищенні сталості транспортної інфраструктури та зменшенні негативного впливу дорожнього будівництва на навколишнє середовище.

Перелік посилань

1. ДСТУ-Н Б В.2.7-315:2016. Настанова щодо виробництва та застосування асфальтобетонних сумішей за знижених технологічних температур із використанням енергозберігаючих добавок. Київ: Мінрегіон України, 2016. – 24 с.

2. ДСТУ Б В.2.7-119:2011. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. – 56 с.

3. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І: Проектування. Частина ІІ: Будівництво. Київ: Мінрегіон України, 2015. – 224 с.

4. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я., Ілляш С.І., Гончаренко В.В. Оптимізація температури приготування, вмісту добавки та властивостей теплих асфальтобетонних сумішей. Дороги і мости, 2024, Вип. 29: 93–104.

5. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я. Удосконалення технології будівництва асфальтобетонних шарів з використанням теплих сумішей. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2017, №99: 90–97.

6. Croteau J.-M., Tessier B. Warm Mix Asphalt Paving Technologies: A Road Builder’s Perspective. Proc. Transportation Association of Canada Conference, Toronto, 2008. – 12 p.

7. D’Angelo J. та ін. Warm-Mix Asphalt: European Practice. FHWA International Technology Scanning Program, 2008.

8. Kristjansdottir O., Muench S.T., Michael L., Burke G. Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. Washington State DOT, Report 650.1, 2006.

9. EAPA. Recommendations for Road Authorities to Optimise Paving Sustainability, Health, Safety and Quality through the Use of Warm Mix Asphalt. Brussels, 2024.

10. Asphalt Industry Alliance. Warm Mix Asphalt: reducing carbon, improving health & safety. London, 2019.

11. NAPA. Emissions & Fuel Savings Using WMA at Reduced Asphalt Mixture Production Temperatures. 2024.

12. FHWA. Long-Term Pavement Performance (LTPP) — Warm-Mix Asphalt Study: Research Plan / Activities. 2022–2023.

13. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: ISO, 2006.

14. EN 13108-1:2016. Bituminous mixtures — Material specifications — Asphalt Concrete. CEN, 2016.

MODERN APPROACHES TO ENSURING PAVEMENT DURABILITY IN THE ABSENCE OF MAJOR REPAIRS

Parfonov Serhii I, Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010,
e-mail: sergey.parfyonov.dp@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-6003-1613

Summary. The paper examines pathways to greening the production and paving technologies of asphalt concrete through the use of energy-saving additives that enable lower operating temperatures, with the aim of reducing energy consumption and CO_2 emissions. An analysis is provided of contemporary approaches to so-called warm mix asphalts (WMA), which deliver the required pavement performance at mixing temperatures 30–40 °C lower than conventional hot mixes. As part of the study, a practical case is presented for placing WMA on Verbova Street, where a dedicated temperature-reducing additive was employed. The outcomes of implementation are evaluated, including compaction process indicators, the pavement's physico-mechanical properties, fuel savings, and reductions in greenhouse-gas emissions. It is shown that energy-saving technologies in asphalt concrete can substantially decrease energy demand and environmental impact without degrading pavement quality. Conclusions are drawn regarding the economic and environmental efficiency of the technology, and prospects are outlined for its wider deployment in road construction.

Keywords: warm mix asphalt, energy-saving additive, reduced temperature, CO_2 emissions, energy savings, environmental efficiency, road construction.

References

1. DSTU-N B V.2.7-315:2016. Guideline on the production and use of asphalt concrete mixtures at reduced technological temperatures using energy-saving additives. Kyiv: Minregion of Ukraine, 2016. 24 p.

2. DSTU B V.2.7-119:2011. Asphalt concrete mixtures and asphalt concrete for roads and airfields. Technical specifications. Kyiv: Minregionbud of Ukraine, 2012. 56 p.

3. DBN V.2.3-4:2015. Public Roads. Part I: Design. Part II: Construction. Kyiv: Minregion of Ukraine, 2015. 224 p.

4. Savenko V.Ya., Mudrychenko A.Ya., Illiash S.I., Honcharenko V.V. Optimization of mixing temperature, additive content and properties of warm asphalt concrete mixtures. Roads and Bridges, 2024, Issue 29: 93–104.

5. Savenko V.Ya., Mudrychenko A.Ya. Improvement of the technology for constructing asphalt concrete layers using warm mixes. Automobile Roads and Road Construction, 2017, No. 99: 90–97.

6. Croteau J.-M., Tessier B. Warm Mix Asphalt Paving Technologies: A Road Builder's Perspective. Proc. Transportation Association of Canada Conference, Toronto, 2008. 12 p.

7. D'Angelo J. et al. Warm-Mix Asphalt: European Practice. FHWA International Technology Scanning Program, 2008.

8. Kristjansdottir O., Muench S.T., Michael L., Burke G. Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. Washington State DOT, Report 650.1, 2006.

9. EAPA. Recommendations for Road Authorities to Optimise Paving Sustainability, Health, Safety and Quality through the Use of Warm Mix Asphalt. Brussels, 2024.

10. Asphalt Industry Alliance. Warm Mix Asphalt: reducing carbon, improving health & safety. London, 2019.

11. NAPA. Emissions & Fuel Savings Using WMA at Reduced Asphalt Mixture Production Temperatures. 2024.

12. FHWA. Long-Term Pavement Performance (LTPP) — Warm-Mix Asphalt Study: Research Plan / Activities. 2022–2023.

13. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: ISO, 2006.

14. EN 13108-1:2016. Bituminous mixtures — Material specifications — Asphalt Concrete. CEN, 2016.

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8
DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-104-115

ІСТОРИЧНИЙ РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАЖУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У РУСІ (WEIGH-IN-MOTION)

HISTORICAL DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR WEIGHING TRANSPORT VEHICLES IN MOTION (WEIGH-IN-MOTION)



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



Шпиг Альона Юріївна, *кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: alena-87@ukr.net, тел. +380988123982*

https://orcid.org/0000-0002-6909-7088



Малініч Віталій Веніамінович, *аспірант, Національний транспортний університет, Київ, Україна,*
e-mail: Malinich3004@gmail.com, тел. +380688529077.

https://orcid.org/0009-0003-4678-5149

Анотація: У статті виконано аналіз історичного розвитоку технологій зважування транспортних засобів у русі (Weigh-in-Motion, WIM) від 1950-х років до сьогодення. Наведено огляд основних типів систем WIM (дорожні, мостові, бортові, низько- та високошвидкісні) та сучасних датчиків. Особливу увагу приділено впровадженню WIM в Україні у 2019–2024 рр., впливу повномасштабного вторгнення на функціонування мережі та заходам з відновлення. За даними офіційних звітів, після запровадження автоматичних штрафів частка перевантажених вантажних тарнспортних засобів зменшилась з 30 % до 5-8 %. У роботі запропоновано напрями вдосконалення програмного забезпечення та методології аналізу даних WIM для науково-дослідних і проєктних потреб.

Ключові слова: зважування в русі, динамічне навантаження, статичне навантаження, навантаження на вісь, маса транспортного засобу, технології вимірювання (низькошвидкісне та високошвидкісне).

Вступ. Об’єкти транспортної інфраструктури постійно піддаються впливу різних антропогенних та природніх факторів. Одним з основних чинників, що впливають на руйнування та довговічність дорожньої мережі є великоваговий транспорт.

Система автоматичного зважування у русі WIM (*Weighing-in-motion*) являється універсальним інструментом до збирання, накопичення та аналізу даних про інтенсивність, склад транспортного потоку, визначення параметрів транспорних засобів (ширина, довжина, висота, швидкість руху), а також визначення навантаг на кожну вісь та загальної маси.

Моніторинг фактичного транспортного потоку на дорожній мережі в режимі реального часу та детальна інформація про транспортні потоки є важливою складовою транспортних досліджень, які допомагають оптимізувати планування та проєктування майбутньої дорожньої мережі. Організації, відповідальні за будівництво та утримання доріг і мостів, потребують реалістичної інформації про фактичне транспортне навантаження на їхню мережу, що є важливою складовою як при проєктуванні об’єктів транспортної інфраструктури (нових доріг і мостів), так і для планування технічного обслуговування існуючої мережі автомобільних доріг.

Виклад основного матеріалу.

Історичний огляд

Вперше WIM був застосований у США в 1950-х роках професором Клайдом Лі і використовувався в дорожніх випробуваннях AASHTO (AASHO, 1961), які розпочалися в 1958 році (рис. 1). Спочатку він використовувався в основному для збору великих зразків динамічних навантажень на вісь і транспортний засіб для цілей проєктування дорожнього покриву. Першим типом датчиків для динамічного зважування були згинальні пластини.



Рисунок 1 – Перший експериментальний майданчик зважування в русі, США 1958 р. [1]
Figure 1 – *T*he first experimental weigh-in-motion site, USA, 1958.

З 1970-х років в Європі були розроблені нові технології датчиків WIM, такі як дротяні, стрічкові та пруткові датчики на основі ємнісного, п'єзоелектричного (керамічного, потім полімерного, а потім кварцового) і, нарешті, волоконно-оптичного зондування. Мостовий WIM також був представлений у США наприкінці 1970-х років, а потім отримав подальший розвиток в Австралії та Європі в 1990-х роках. У 1970-х і 1980-х роках переважно використовували дані WIM:

• як вхідні дані для проєктування та утримання дорожнього покриву, а також для калібрування кодів проєктування мостів (наприклад, канадський код, Єврокод),

• для оцінки мостів, розрахунку залишкового втомного ресурсу, екстремальних навантажень і навантажувальних ефектів,

• для моніторингу дорожнього руху та збору статистики вантажних автомобільних перевезень.

У 1990-х роках у Північній Америці було опубліковано перший стандарт WIM (ASTM-E1318-09, 2009), а в рамках проєкту COST 323 було розроблено проєкт європейських специфікацій WIM, а також звіти про загальноєвропейські випробування системи WIM (COST 323, 2002). Європейський дослідницький проєкт WAVE (2002) та інші ініціативи забезпечили вдосконалення технологій та нових методологій WIM. Ці перші випробування були проведені з поєднанням систем WIM з відео в якості інструменту, що допомагає контролювати перевантаження (WIM-NL, 2002). На початку 2000-х років точність і надійність систем WIM значно підвищилися, і вони стали частіше використовуватися для скринінгу перевантаження і попереднього відбору для придорожнього вагового контролю (віртуальні станції зважування). OIML R134 (2009) був опублікований як міжнародний стандарт низькошвидкісних систем WIM для легальних застосувань, таких як плата за проїзд за вагою і прямий ваговий контроль. Зовсім недавно, стандарт NMi WIM (2016) пропонує основу для впровадження високошвидкісних систем WIM для прямого автоматичного контролю та безперешкодного збору плати за проїзд за вагою. Крім того, бортові системи WIM зараз використовуються не тільки в комерційних цілях, але й в державних установах. Більше інформації про історію WIM можна знайти в перелічених звітах WAVE і COST 323.

Ключові стандарти: – ASTM E1318 (1990, остання редакція 2009) – COST 323 (1993–2002) – європейські специфікації WIM – OIML R134 (2006) – низькошвидкісні системи – Специфікація високошвидкісного WIM (2016–2023).

Технології зважування транспортних засобів

Незалежно від використовуваної технології вимірювання, існує кілька різних способів вимірювання повної маси транспортного засобу, навантаження на вісь і навантаження на групу осей транспортного засобу (рис.2).



Рисунок 2 – Технології, що використовуються в системах WIM [2]
Figure 2 – Technologies used in WIM systems

Дорожні WIM системи

Створення Системи WIM в Україні здійснюється відповідно до Державної цільової економічної програми розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018-2022 роки, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 21 березня 2018 року № 382, з метою збереження дорожнього покриву та скорочення видатків на утримання автомобільних доріг загального користування державного значення.

Впродовж 2019-2020 років, в рамках реалізації Пілотного проєкту «Проектування постачання і монтаж шести майданчиків зважування в русі на дорогах навколо Києва та допоміжного офісу» було споруджено 6 майданчиків WIM та Центр оброблення даних.

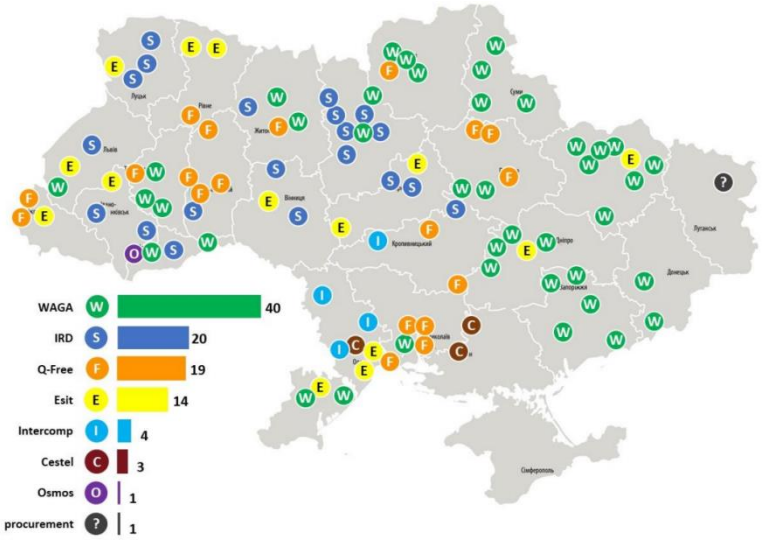


Рисунок 3 – Розподіл майданчиків WIM за постачальниками технічних рішень
Figure 3 – Distribution of WIM sites by technical solution providers

Наприкінці 2019 року Укравтодором спільно зі Службами автомобільних доріг в областях та Укртрансбезпекою було складено перелік ділянок (приблизно 250) [7-11] автомобільних доріг загального користування, рекомендованих для спорудження майданчиків WIM з огляду на наступні причини:

− зазнають значного руйнівного впливу від великовагових транспортних засобів;

− знаходяться поблизу підприємств або організацій, які створюють або поглинають великовагові транспортні потоки, наприклад, порти, елеватори, кар'єри тощо;

− мають прийнятні геометричні характеристики, точки підключення до електромереж та ліній зв'язку;

− були нещодавно відремонтовані або ремонтні роботи заплановані на найближчі роки, для забезпечення необхідних характеристик дорожнього одягу: міцність та рівність.

Спорудження майданчиків WIM впродовж 2020-2021 років здійснювалось на виконання:

− Указу Президента України № 837/2019 від 08 листопада 2019 року в частині налагодження ефективного габаритно-вагового контролю на автомобільних дорогах;

− кроку 270 Плану пріоритетних дій Уряду на 2020 рік, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 09 вересня 2020 року № 1133 «Про затвердження плану пріоритетних дій Уряду на 2020 рік»;

− кроку 300 Плану пріоритетних дій Уряду на 2021 рік, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24 березня 2021 року № 276-р «Про затвердження плану пріоритетних дій Уряду на 2021 рік»;

− завдання 3 «Забезпечення безпеки на дорогах та безпеки дорожньої інфраструктури» заходу 7 «Влаштування автоматичних пунктів (майданчиків) для забезпечення габаритно-вагового контролю (комплексів зважування у русі WIM)» Державної програми підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2023 року, затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України від 21 грудня 2020 року № 1287.

На рис. 3 наведено розподіл майданчиків WIM за постачальниками технічних рішень.

З початку повномасштабного вторгнення 24.02.2022 відбулись зміни, які позначилась і на роботі системи WIM, частину з майданчиків якої було зруйновано внаслідок бойових дій, терористичних актів та диверсій, спричинених військовою агресією російської федерації.

Відновлення роботи майданчиків WIM за основними напрямками перевезень вантажів (окрім зони бойових дій) розпочалося в травні 2024 р. У зв’язку зі стрімким зростанням кількості вантажних перевезень (зокрема зерна) з центральної частини України до західного кордону, на першому етапі було відновлено роботу 25 майданчиків WIM, споруджених на маршрутах до кордонів з країнами ЄС.

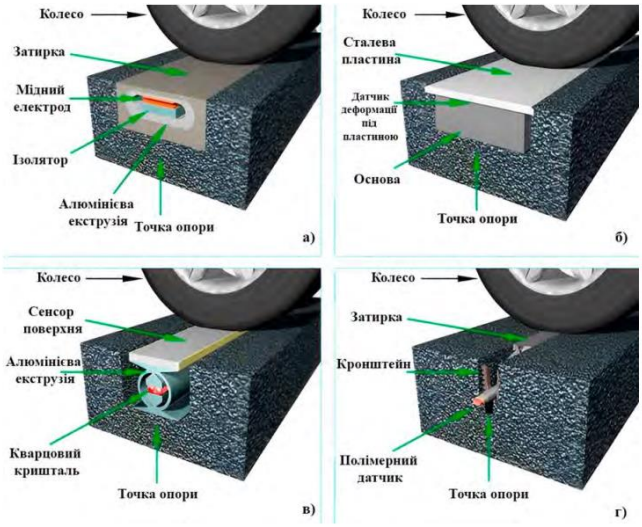


Рисунок 4 – Технології датчиків WIM для дорожнього покрив: (а) ємнісний датчик, (б) згинаюча пластина, (в) п'єзокварцовий, (г) п'єзоелектричний або п'єзополімерний стрижень

Figure 4 – WIM sensor technologies for road surfaces: (a) capacitive sensor, (b) bending plate, (c) piezoelectric quartz, (d) piezoelectric or piezopolymer rod

Станом на грудень 2024 року:

- 57 майданчиків WIM відновили роботу до можливості використання даних для накладання штрафів за порушення габаритно-вагових обмежень;
- 2 майданчики WIM перебували на стадії сертифікації перед введенням в експлуатацію;
- 10 майданчиків WIM потребували відновлення у зв’язку з пошкодженням внаслідок бойових дій;
- 11 майданчиків WIM перебували на етапі передавання на баланс Служб відновлення у відповідних областях;
- 1 майданчик WIM перебував на етапі підключення до мереж зв’язку та енергоживлення;
- 17 майданчиків WIM перебували на стадії припинення спорудження/монтажу у зв’язку з відсутністю фінансування;

- 4 майданчики WIM перебували на тимчасово окупованих територіях;
- 1 майданчик WIM перебував на етапі скасованих закупівель.

У зв'язку з воєнним станом та відсутністю фінансування спорудження нових майданчиків WIM у 2025 році не здійснювалось.

У дорожній системі України на комплексах WIM вимірювальні датчики встановлюються у дорожньому покриві (рис.4) [3]. Датчики вимірюють динамічну вертикальну складову сили, що діє на кожне колесо транспортного засобу, коли автомобіль проїжджає над датчиками системи. Виміряні зусилля в шинах разом з іншими виміряними або розрахованими параметрами, такими як швидкість і поздовжнє положення транспортного засобу в смузі руху, потім використовуються для оцінки повної маси і навантажень, що припадають на кожне колесо, вісь і групу осей відповідного статичного транспортного засобу.

Система автоматичного зважування у русі WIM система складається з комплексу вагових датчиків, які влаштовані у дорожній покрив та офісу (центрального серверу) (рис. 5), який включає блоки збирання, аналізування, оброблення даних та їх передачі за встановленими протоколами.

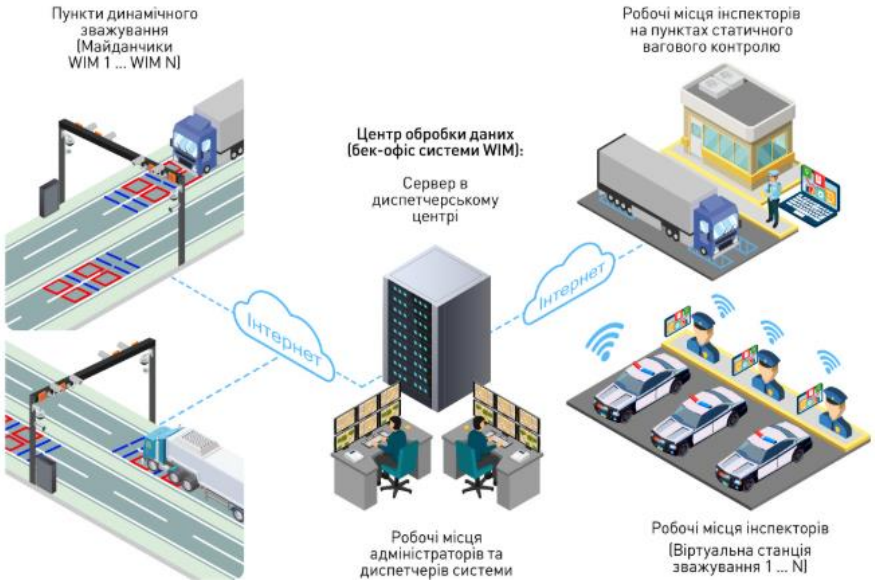


Рисунок 5 – Архітектура автоматизованої системи динамічного зважування [4]
Figure 5 – Architecture of an automated dynamic weighing system

Низькошвидкісне зважування

При низькошвидкісному WIM (LS-WIM) зважування виконується в спеціальній контрольованій зоні, переважно поза смугою руху, на рівній і гладкій платформі (як правило, бетонній), довжиною понад 30 м. У зоні зважування контролюється швидкість і поперечне переміщення транспортних засобів, що проїжджають, з метою усунення динамічного впливу транспортного засобу і, таким чином, забезпечення рівності сил удару в шинах зі статичним навантаженням на колеса (рис. 6, 7). Системи LS-WIM – це здебільшого тензометричні ваги, що базуються на різних технологіях вимірювання.

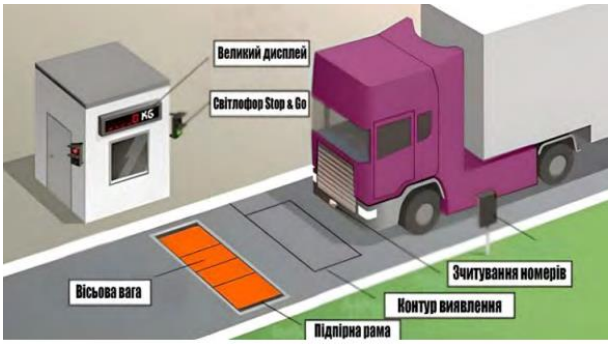


Рисунок 6 – LS-WIM система на основі пластин
Figure 6 – LS-WIM plate-based system [5]



Рисунок 7 – Пункт ГВК на автомобільній дорозі М-05 Київ-Одеса км 210+600
Figure 7 – DWK checkpoint on the road M-05 Kyiv-Odesa, km 210+600

Високошвидкісне зважування

При високошвидкісному WIM (HS-WIM) зважування проводиться на відкритих смугах руху на нормальній швидкості (тобто 30 км/год або вище) і в умовах вільного потоку (рис. 8, 9). На вимірювання впливає динаміка транспортного засобу (вертикальні прискорення), яка залежить від:

• геометрії дорожнього покриву перед ділянкою WIM (сюди входить рівність поверхні покриву, колійність, нерівності, осідання, вибоїни та ухили дороги);

• порушення руху транспортного засобу, спричинені манерою водіння, прискоренням, гальмуванням, рульовим керуванням та умовами навколишнього середовища, такими як вітер, дощ, сніг, ожеледиця;

• реакції підвіски транспортного засобу на вищезгадані впливи (вона залежить від маси транспортного засобу, типу вантажу, розподілу навантаження на вісь і системи підвіски транспортного засобу).



Рисунок 8 – WIM система на основі смуг
Figure 8 – WIM system based on strips



Рисунок 9 – WIM-комплекс (WIM 52) М-14 (км 126+562) у Миколаївській області
Figure 9 – The WIM complex (WIM 52) M-14 highway (km 126+562) in the Mykolaiv region

Що вимірює система WIM?

Окрім вимірювання повної маси транспортного засобу, навантаження на вісь і часто навантаження на колеса транспортних засобів, що проїжджають повз, система WIM також визначає інші параметри, пов'язані з транспортним засобом та його проїздом через систему WIM. Все це об'єднується в те, що часто називають «Звітом про транспортний засіб», який складається з:

- унікального номеру запису;

- місцезнаходження системи WIM, включаючи смугу та напрямок руху транспортного засобу;
- дати та часу проїзду;
- швидкості транспортного засобу;
- відстані між осями;
- колісної бази та/або довжини транспортного засобу;
- класифікації транспортного засобу.

Залежно від застосування, система WIM може бути поєднана з іншими датчиками або інтелектуальними транспортними системами (ITS). У таких випадках запис про транспортний засіб може бути розширений:

- температура дорожнього покриву або мосту в одному або декількох місцях;
- прогин дорожнього покриву;
- висота та/або ширина транспортного засобу;
- виявлення однієї/двох шин;
- розподіл тиску в шинах;
- бокове положення транспортного засобу в смузі руху;
- ідентифікаційний номер (мітка) транспортного засобу;
- загальне зображення транспортного засобу;
- номерний знак або реєстраційний номер;
- зображення та код ідентифікаційного знаку небезпечного вантажу;
- підпис транспортного засобу;
- коефіцієнт динамічного підсилення мосту.

Зважування в русі – процес вимірювання динамічних навантажень на автомобільні шини рухомого транспортного засобу для оцінювання загальної маси транспортного засобу і частки цієї маси, що припадає на кожну вісь чи групу осей відповідного транспортного засобу з урахуванням параметрів відстані між осями (рис. 10).

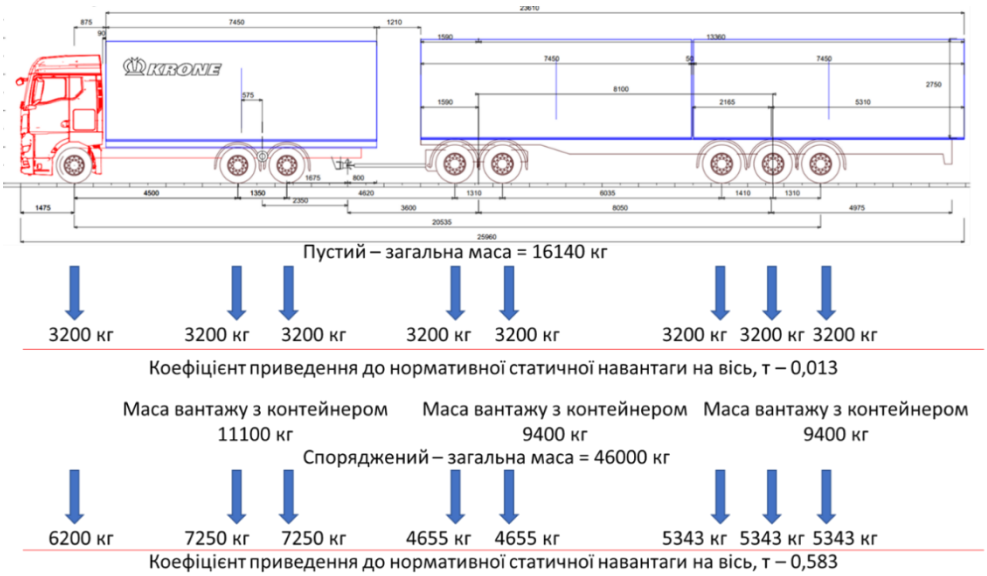


Рисунок 10 – Розподілення навантаг на осі автопоїзда пустого та у спорядженому стані
Figure 10 – Load distribution on the axles of a road train when empty and loaded

На рисунку 11 представлені результати, отримані на основі виміряних даних WIM ($ESAL_{WIM}$), що порівнюються з розрахунковим еквівалентним навантаженням (ESALрозрахункове).

ESAL (Equivalent Single Axle Load) розшифровується як еквівалентне навантаження на одиночну вісь і використовується для кількісної оцінки пошкоджень дорожніх покривів внаслідок дії на нього проїжджаючого транспорту. Вимірюється в одиницях еквівалентних навантажень на одиночну вісь (ESALs). Найбільш поширеною одиницею є навантаження 80 кН еквівалентне навантаженню на одиночну вісь. Тобто, значення ESAL вказує на те, скільки еквівалентних навантажень на одиночну вісь (з вантажем 80 кН) пройшло по дорозі.

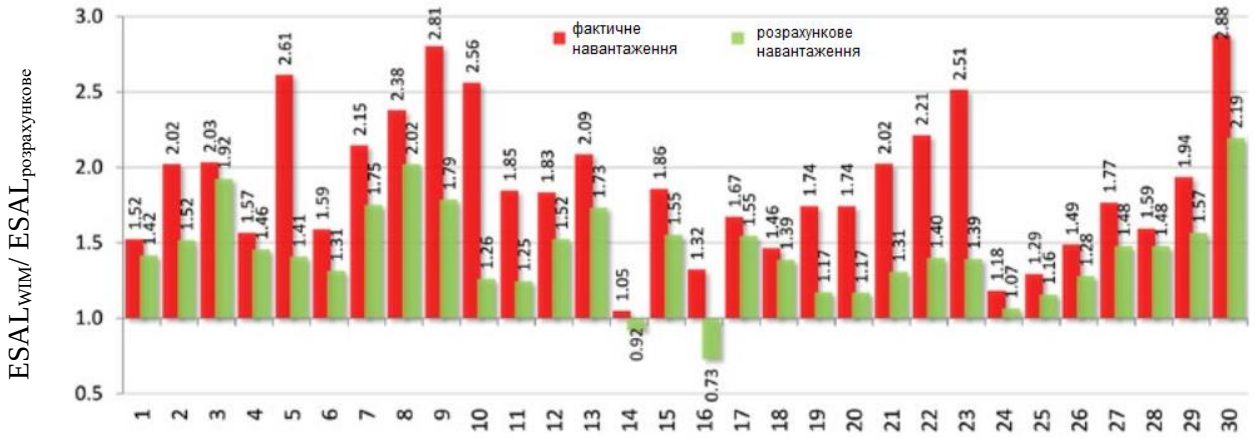


Рисунок 11 – Різниця розрахункових та виміряних навантажень на дорожній одяг [6]
Figure 11 – The difference between calculated and measured loads on road surfaces [6]

Мостові WIM системи

Технологію зважування мостів у русі Bridge WIM (B-WIM) було запроваджено в США наприкінці 1970-х років професором Фредом Мозесом. Існуючий міст використовується як ваги для визначення навантаження на осі та повної ваги вантажівок, що проїжджають повз. Це робиться шляхом моніторингу деформацій у мостовому полотні (балках або плиті), які викликаються транспортними засобами, що перетинають його. Найпоширенішими датчиками, що використовуються, є тензодатчики та перетворювачі деформації. Значного прогресу в точності та ефективності B-WIM було досягнуто в 1990-х роках завдяки кільком дослідницьким проєктам, що фінансуються Європейською Комісією. Сьогодні системи B-WIM використовуються та розвиваються в багатьох країнах світу.

Дані сучасних системи B-WIM мають ті ж показники для кожного транспортного засобу, що й більш поширені дорожні системи WIM. Крім того, вони також проводять вимірювання деформацій, ліній впливу, коефіцієнтів розподілу навантаження та динамічні навантаження, що покращує структурний аналіз мостів.

B-WIM – це спеціальний тип динамічної системи зважування, де датчики кріпляться до софіту (нижньої сторони плити та/або балок) моста, віадука або водопропускної труби (рис. 12). Датчики зазвичай вимірюють деформації, спричинені вигином мосту під дією транспортних засобів, що проїжджають повз. Знаючи ключові характеристики поведінки мосту під навантаженням, так звані лінії впливу, система розраховує повну масу і навантаження на вісь транспортного засобу, що проїжджає повз. По суті, міст працює як великі динамічні ваги. На додаток до тієї ж інформації про транспортний засіб, що надається системами WIM для дорожнього покриву, системи B-WIM також збирають цінні дані про поведінку мосту, які можуть бути використані для оцінки безпеки мостів, що вимірюються, або подібних до них.



Рисунок 12 – Мостовий WIM-комплекс WIM75 на км 22+453 дороги Р-62 в Чернівецькій області
Figure 12 – WIM75 bridge WIM complex at km 22+453 of the P-62 road in Chernivtsi region

Висновки. Важливість збору даних про масу та габарити автомобіля полягає не тільки у регулюванні, збереженні, підтриманні хорошого стану мережі автомобільних доріг та безпеки дорожнього руху. Ці дані в поєднанні з іншими параметрами, такими як: дата і час, місцезнаходження, швидкість і тип транспортного засобу, надають інформацію про завантаження транспортних потоків великовантажними транспортними засобами.

Впровадження системи зважування в русі допомагають зменшити інтенсивність руйнування українських доріг, а саме: утворення тріщин, колійностей та вибоїн майже одразу після введення автомобільної дороги в експлуатацію після будівництва чи ремонту; підвищує безпеку для учасників дорожнього руху – перевантажена вантажівка на 25 % має вдвічі більший гальмівний шлях (за несприятливих погодних умов цей показник зростає). У разі виявлення ознак порушень встановлених габаритно-вагових обмежень, комплекси зважування в русі надсилають дані щодо порушення до Центру обробки даних Державної служби України з безпеки на транспорті для їх опрацювання та накладання штрафу.

В Україні за період 2019–2024 рр. створено одну з найбільших у Європі мереж автоматичного вагового контролю, яка, попри війну, продовжує відновлюватись.

Запровадження автоматичних штрафів зменшило частку перевантажених транспортних засобів у 6–7 разів.

Наявне програмне забезпечення мистеми WIM і щорічні технічні звіти потребують доопрацювання для можливості забезпечення доступу до наступних даних про:

− температуру повітря;

− температуру покриву;

− розроблення блоку з розрахування коефіцієнтів приведення короткочасних обліків до середньодобової річної інтенсивності руху;

− розроблення блоку з розрахування коефіцієнтів руйнівного впливу для кожного типу транспортних засобів;

– розроблення блоку з розрахування коефіцієнтів приросту інтенсивності;

– розроблення блоку з розрахування з оброблення й аналізування даних із майданчиків WIM, яка необхідна для продовження наукових досліджень щодо руйнівного впливу від сучасних транспортних засобів і використання реальних отриманих даних для розрахунку конструкцій дорожнього одягу.

Перелік посилань

1. 70 Years of Innovation in Dynamic Weighing! [Електронний ресурс]: https://www.iwim.it/en/dynamic-weighing-history-innovation/

2. IS-WIM (International Society for Weigh-in-Motion): Guide for users. [Електронний ресурс] https://www.is-wim.net/what-is-wim/introduction/

3. Piotr Burnos, Dawid Rys. The Effect of Flexible Pavement Mechanics on the Accuracy of Axle Load Sensors in Vehicle Weigh-in-Motion Systems. Sensors 2017, 17(9), 2053; https://doi.org/10.3390/s17092053. URL: https://www.researchgate.net/publication/319597622_The_Effect_of_Flexible_Pavement_Mechanics_on_the_Accuracy_of_Axle_Load_Sensors_in_Vehicle_Weigh-in-Motion_Systems

4. SEA (Weigh-in-Motion). [Електронний ресурс] https://www.sea.com.ua/ua/weight-in-motion/

5. Low-speed Weigh-in-Motion. [Електронний ресурс] http://www.sterela-its.com/sterela-its-ls-wim.html#gsc.tab=0

6. IS-WIM (International Society for Weigh-in-Motion): Pavement Engineering. [Електронний ресурс] https://www.is-wim.net/what-is-wim/applications-of-wim-data/pavement-engineering/

7. Райковський В.Ф. Удосконалення методу розрахунку надійності нежорсткого дорожнього одягу при дії навантаження : дис. … канд. техн. наук : 05.22.11. Київ, 2021. 211 с.

8. Вознюк А.Б. Удосконалення методу прогнозування аварійно-небезпечних ділянок на мережі автомобільних доріг : дис. … канд. техн. наук : 05.22.01. Київ, 2021. 226 с.

9. Система зважування в русі (Weigh in motion). Технічний звіт про роботу у 2019-2021 роках. URL: https://bit.ly/wimrprt21 (дата звернення: 01.09.2022).

10. Система зважування в русі (Weigh in motion). Технічний звіт про роботу у 2022-2024 роках. (дата звернення: 17.04.2025).

11. Гамеляк І.П., Райковський В.Ф. Аналіз зміни коефіцієнтів приросту інтенсивності транспортних засобів в часі для автомобільних доріг України. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип. 94. С. 226–238.

HISTORICAL DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR WEIGHING TRANSPORT VEHICLES IN MOTION (WEIGH-IN-MOTION)

Raikovskyi Vitaliy F., PhD (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.

Shpyh Alona Yu., PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: alena-87@ukr.net, tel.+380988123982, https://orcid.org/0000-0002-6909-7088.

Malinich Vitalii V, Postgraduate student of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: Malinich3004@gmail.com, тел. +380688529077, https://orcid.org/0009-0003-4678-5149

Summary. The article analyzes the historical development of weigh-in-motion (WIM) technologies from the 1950s to the present day. It provides an overview of the main types of WIM systems (road, bridge, on-board, low- and high-speed) and modern sensors. Particular attention is paid to the implementation of WIM in Ukraine in 2019–2024, the impact of full-scale invasion on the functioning of the network, and recovery

measures. According to official reports, after the introduction of automatic fines, the share of overloaded freight vehicles decreased from 30% to 5-8%. The paper proposes directions for improving software and WIM data analysis methodology for research and design needs.

Keywords: in-motion weighing, dynamic load, static load, axle load, vehicle weight, measurement technologies (low-speed and high-speed).

References

1. 70 Years of Innovation in Dynamic Weighing! [Електронний ресурс]: https://www.iwim.it/en/dynamic-weighing-history-innovation/
2. IS-WIM (International Society for Weigh-in-Motion): Guide for users. [Електронний ресурс] https://www.is-wim.net/what-is-wim/introduction/
3. Piotr Burnos, Dawid Rys. The Effect of Flexible Pavement Mechanics on the Accuracy of Axle Load Sensors in Vehicle Weigh-in-Motion Systems. Sensors 2017, 17(9), 2053; https://doi.org/10.3390/s17092053. URL: https://www.researchgate.net/publication/319597622_The_Effect_of_Flexible_Pavement_Mechanics_on_the_Accuracy_of_Axle_Load_Sensors_in_Vehicle_Weigh-in-Motion_Systems
4. SEA (Weigh-in-Motion). [Електронний ресурс] https://www.sea.com.ua/ua/weight-in-motion/
5. Low-speed Weigh-in-Motion. [Електронний ресурс] http://www.sterela-its.com/sterela-its-ls-wim.html#gsc.tab=0
6. IS-WIM (International Society for Weigh-in-Motion): Pavement Engineering. [Електронний ресурс] https://www.is-wim.net/what-is-wim/applications-of-wim-data/pavement-engineering/
7. Raikovskyi V.F. Udoskonalennya metodu rozrakhunku nadiynosti nezhorstkoho dorozhnoho odyahu pry diyi navantazhennia [Improving the method of the reliability calculation of flexible pavement underload action]. PhD (Ing.). Kyiv, 2021. 211 p. [in Ukrainian].
8. Vozniuk A. B. Udoskonalennya metodu prohnozuvannya avariyno-nebezpechnykh dilianok na merezhi avtomobilnykh dorih [Improving the method of forecasting hazardous locations on the road network]. PhD (Ing.). Kyiv, 2021. 226 p. [in Ukrainian].
9. Systema zvazhuvannia v rusi. Tekhnichnyy zvit pro robotu u 2019-2021 rokakh [Weigh in motion system. Technical report on work in 2019-2021]. URL: https://bit.ly/wimrprt21 (Last accessed: 01.09.2022) [in Ukrainian].
10. Systema zvazhuvannia v rusi. Tekhnichnyy zvit pro robotu u 2019-2021 rokakh [Weigh in motion system. Technical report on work in 2022-2024]. URL: https://bit.ly/wimrprt21 (Last accessed: 17.04.2025) [in Ukrainian].
11. Hamelyak I.P., Raikovskyi V.F. Analiz zminy koefitsiyentiv pryrostu intensyvnosti transportnykh zasobiv v chasi dlya avtomobilnykh dorih Ukrayiny [Analysis of the change in the coefficients of increase in the intensity of vehicles over time for the roads of Ukraine]. Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo. 2015. Iss. 94. P. 226–238. [in Ukrainian].

УДК 528:332.3
UDC 528:332.3

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-116-123

ФОРМУВАННЯ КІЛЬКІСНОЇ ОСНОВИ РОЗРОБКИ Й ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ РЕГІОНІВ

FORMATION OF A QUANTITATIVE BASIS FOR THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF GEO-ECOLOGICAL MONITORING OF LAND USE FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN REGIONS



Ватуля Гліб Леонідович, *доктор технічних наук, професор, Проректор з науково-педагогічної роботи, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: Glib.Vatulia@kname.edu.ua*

https://orcid.org/0000-0002-3823-7201



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, *доктор економічних наук, викладач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: vasssgoi@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0003-1822-4478



Нелін Євген Олександрович, *здобувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: zhekanelin@gmail.com*

https://orcid.org/0009-0000-8224-3062

Анотація. У статті вирішено актуальне завдання відносно формування кількісної основи розробки й застосування геоекологічного моніторингу землекористування транспортної інфраструктури регіонів шляхом використання методу оцінки. Виокремлені екологічні, земельні й чинники транспортної інфраструктури й запропоновані етапи розробки методу оцінки рівня

формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури. Це дозволило сформувати кількісну основу для розробки й застосування геоекологічного моніторингу. Для реалізації методу оцінки розроблені консолідовані й інтегральна моделі, що надало можливості визначити інтегральний показник рівня розробки й застосування геоекологічного моніторингу землекористування транспортної інфраструктури регіонів. У більшості регіонах спостерігається несуттєвий рівень формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури. Встановлено зниження представленого інтегрального показника у прифронтових та регіонах де ведуться бойові дії.

Ключові слова: геоекологічний моніторинг, використання земель транспортної інфраструктури, інтегральний метод оцінки, локальні показники, консолідовані екологічні, земельні й чинники транспортної інфраструктури, консолідовані й інтегральна моделі.

Вступ. Сучасні надзвичайні умови, які характеризуються внутрішніми трансформаційними процесами, зниженням рівня ефективності використання земель (ВЗ), поглибленням внутрішніх диспропорцій, уповільненням темпів регіонального розвитку, впливом наслідків агресії РФ, потребують переосмислення підходів до землекористування транспортної інфраструктури (ТІ) регіонів.

Транспорт є кровоносними судинами держави, що забезпечують функціонування різних виробничих сфер. Поряд з цим, за останні роки відбувається зниження ефективності функціонування транспорту та розвитку транспортної інфраструктури. Виникає необхідність застосування сучасного моніторингового інструментарію для перманентного контролю, обліку за використанням земель транспортної інфраструктури, враховуючи вплив екологічних чинників, важливих яких визначена у Цілях сталого розвитку України на період до 2030 року [1].

Таким чином, тема дослідження щодо формування кількісної основи розробки й застосування геоекологічного моніторингу (ГМ) використання земель транспортної інфраструктури регіонів є актуальним і своєчасним завданням.

Огляд існуючих теоретичних розробок. В існуючих наукових розробках відсутні єдині підходи до визначення геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів. Зокрема, визначені окремі його елементи, а саме геоінформаційна його складова, де виокремлюються функціональна та інструментальна складові [2, 3].

Для розробки ГМ ВЗ транспортної інфраструктури характеризуються відповідні транспортні чинники та напрями їх впливу на землекористування [4, 5]. Геоекологічний моніторинг здійснюється через призму визначення стану та використання земель. На земельних характеристиках відносно реалізації моніторингових процедур зосереджена увага у [6–8].

При здійсненні геоекологічного моніторингу визначаються екологічні чинники, значення й важливість яких наголошується у роботах [9–11].

Узагальнюючи існуючи наукові розробки, удосконалено категоріальний апарат до визначення геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів, який на відміну від існуючих, базується на результатах систематизації теоретико-методичних підходів, застосуванні геоінформаційного й математичного інструментарію, враховуючі вплив екологічних, земельних і чинників транспортної інфраструктури, що надало можливості сформувати наукову основу розробки й реалізації технології ГМ для зростання ефективності використання земель ТІ.

Для розробки й реалізації геоекологічного моніторингу формується кількісна основа шляхом застосування методу оцінки рівня застосування ГМ використання земель транспортної інфраструктури регіонів.

Метою дослідження є формування кількісної основи розробки й застосування геоекологічного моніторингу землекористування транспортної інфраструктури регіонів шляхом використання методу оцінки.

Досягнення поставленої мети здійснюється на основі реалізації поставлених завдань:

– характеристика етапів розробки методу оцінки рівня формування й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів;

– визначення чинників багаторівневої системи показників;
– розробка консолідованих та інтегральної моделей оцінки рівня формування й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів;
– представлення результатів оцінки інтегрального показника рівня формування й застосування ГМ ВЗ ТІ регіонів;
– інтерпретація отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу. Розробка й реалізація методу оцінки рівня формування й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів включає сукупність взаємопов'язаних етапів:

1. Формування інформаційно-просторового й аналітичного забезпечення відносно формування й реалізації ГМ ВЗ транспортної інфраструктури регіонів.
2. Виокремлення чинників формування й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів.
3. Побудова багаторівневої системи показників оцінки рівня формування й реалізації ГМ ВЗ транспортної інфраструктури регіонів.
4. Оцінка локальних показників із застосуванням аналітичних і експертних методів.
5. Побудова консолідованої моделі оцінки показників рівня формування й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів.
6. Оцінка консолідованих показників.
7. Побудова інтегральної моделі оцінки.
8. Визначення вагових коефіцієнтів.
9. Оцінка інтегрального показника рівня формування й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів.
10. Інтерпретація отриманих результатів.

Визначено три рівня системи показників формування й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів: локальний, консолідований, інтегральний.

Це формує багаторівневу систему показників оцінки. На локальному рівні застосовуються аналітичні й експертні методи для оцінки відповідних чинників (табл. 1).

Відповідно до запропонованих етапів, побудована консолідована модель оцінки показників рівня формування й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів:

$$GMLUTI_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{N} GMLUTI_{ijN}}. \quad (1)$$

Консолідовані моделі для конкретних показників наступні:

$$GMLUTI_{11} = \sqrt[21]{GMLUTI_{111} * GMLUTI_{112} * \dots * GMLUTI_{1121}}. \quad (2)$$

$$GMLUTI_{21} = \sqrt[12]{GMLUTI_{211} * GMLUTI_{212} * \dots * GMLUTI_{2112}}. \quad (3)$$

$$GMLUTI_{31} = \sqrt[34]{GMLUTI_{311} * GMLUTI_{312} * \dots * GMLUTI_{3134}}. \quad (4)$$

Для оцінки інтегрального показника рівня формування та використання геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів розроблена модель:

$$I_{GMLUTI} = V_1 * GMLUTI_{11} + V_2 * GMLUTI_{21} + V_3 * GMLUTI_{31}, \quad (5)$$

де V_1, V_2, V_3 – вагові коефіцієнти взаємного впливу та впливу на інтегральний показник, що оцінюються із застосуванням методу аналізу ієрархій, відн. од.

Таблиця 1 – Застосування аналітичних й експертних методів оцінки локальних показників формування й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів

Table 1 – Application of analytical and expert methods for assessing local indicators of the formation and implementation of geo-ecological monitoring of land use in regional transport infrastructure

Локальні показники	Аналітичні (А), експертні (Е) методи
Екологічні	
$GMLUTI_{111}$, $GMLUTI_{112}$, $GMLUTI_{113}$, $GMLUTI_{114}$, $GMLUTI_{115}$, $GMLUTI_{116}$, $GMLUTI_{117}$, $GMLUTI_{118}$, $GMLUTI_{119}$, $GMLUTI_{1110}$, $GMLUTI_{1111}$, $GMLUTI_{1112}$, $GMLUTI_{1113}$, $GMLUTI_{1114}$, $GMLUTI_{1115}$, $GMLUTI_{1116}$, $GMLUTI_{1117}$, $GMLUTI_{1118}$	*E*
$GMLUTI_{1119}$, $GMLUTI_{1120}$, $GMLUTI_{1121}$	*A*
Земельні	
$GMLUTI_{211}$, $GMLUTI_{212}$, $GMLUTI_{213}$, $GMLUTI_{214}$, $GMLUTI_{215}$, $GMLUTI_{216}$, $GMLUTI_{217}$, $GMLUTI_{218}$	*E*
$GMLUTI_{219}$, $GMLUTI_{2110}$, $GMLUTI_{2111}$, $GMLUTI_{2112}$	*A*
Транспортної інфраструктури	
$GMLUTI_{311}$, $GMLUTI_{312}$, $GMLUTI_{313}$, $GMLUTI_{314}$, $GMLUTI_{315}$, $GMLUTI_{316}$, $GMLUTI_{317}$, $GMLUTI_{318}$, $GMLUTI_{319}$, $GMLUTI_{3110}$, $GMLUTI_{3111}$, $GMLUTI_{3112}$, $GMLUTI_{3113}$, $GMLUTI_{3114}$, $GMLUTI_{3115}$, $GMLUTI_{3116}$, $GMLUTI_{3117}$, $GMLUTI_{3118}$, $GMLUTI_{3119}$, $GMLUTI_{3120}$, $GMLUTI_{3121}$, $GMLUTI_{3122}$, $GMLUTI_{3123}$, $GMLUTI_{3124}$, $GMLUTI_{3125}$, $GMLUTI_{3126}$, $GMLUTI_{3127}$, $GMLUTI_{3128}$, $GMLUTI_{3129}$, $GMLUTI_{3130}$	*E*
$GMLUTI_{3131}$, $GMLUTI_{3132}$, $GMLUTI_{3133}$, $GMLUTI_{3134}$	A

Враховуючи зміни показників у відповідних періодах, розроблені моделі оцінки інтегрального показника:

у періоді 1:

$$I^1_{I_{GMLUTI}} = V^1_1 * GMLUTI^1_{11} + V^1_2 * GMLUTI^1_{21} + V^1_3 * GMLUTI^1_{31}, \quad (6)$$

$$I^2_{I_{GMLUTI}} = V^2_1 * GMLUTI^2_{11} + V^2_2 * GMLUTI^2_{21} + V^3_3 * GMLUTI^2_{31}, \quad (7)$$

де $I^1_{I_{GMLUTI}}$, $I^2_{I_{GMLUTI}}$ – інтегральні показники рівня формування та використання геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів у періоді 1 і 2, відн. од.;

V^1_1, V^1_2, V^1_3 – вагові коефіцієнти взаємного впливу та впливу на інтегральний показник, що оцінюються із застосуванням методу аналізу ієрархій за період 1, відн. од.;

V^2_1, V^2_2, V^2_3 – вагові коефіцієнти взаємного впливу та впливу на інтегральний показник, що оцінюються із застосуванням методу аналізу ієрархій за період 2, відн. од.

Визначені інтегральні показники рівня формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури (табл. 2).

Досліджений період визначено накопиченням негативних явищ у сфері формування й застосування ГМ ВЗ транспортної інфраструктури. На низькому рівні забезпечуються представлені процеси у регіонах: Донецький, Запорізький, Луганський, Миколаївський, Сумський, Харківський, Херсонський.

Таким чином, зростання кризових явищ проявляються у прифронтових регіонах, областях, де ведуться бойові дії або на окупованих територіях. У більшості регіонах спостерігається несуттєвий рівень формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури.

Таблиця 2 – Результати оцінки інтегрального показника рівня формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів за період 1, відн. од.

Table 2 – Results of the assessment of the integral indicator of the level of formation and application of geo-ecological monitoring of land use by transport infrastructure in regions for period 1, ref. unit.

Регіони	Консолідовані чинники
	I^1_{GMLUTI}
Вінницький	2,373
Волинський	2,335
Дніпропетровський	2,094
Донецький	1,549
Житомирський	2,338
Закарпатський	2,424
Запорізький	1,864
Івано-Франківський	2,343
Київський	2,376
Кіровоградський	2,278
Луганський	0,623
Львівський	2,353
Миколаївський	1,852
Одеський	2,253
Полтавський	2,299
Рівненський	2,361
Сумський	1,975
Тернопільський	2,387
Харківський	1,887
Херсонський	1,619
Хмельницький	2,357
Черкаський	2,45
Чернівецький	2,475
Чернігівський	2,358

За досліджений період відбувається підвищення інтегрального показника рівня формування й застосування ГМ ВЗ транспортної інфраструктури. Поряд з цим, на низькому рівні інтегрального показника визначені у регіонах: Донецькому, Запорізькому, Луганському, Миколаївському, Харківському, Херсонському. У більшості регіонах відбувається несуттєвий рівень формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури. Найбільшими значеннями інтегрального показника характеризувались Чернівецький, Черкаський, Закарпатський, Київський, Тернопільський, Рівненський регіони.

Результати оцінки інтегрального показника рівня формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів за період 2 представлені у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати оцінки інтегрального показника рівня формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів за період 2, відн. од.

Table 3 – Results of the assessment of the integral indicator of the level of formation and application of geo-ecological monitoring of land use by transport infrastructure in regions for period 2, ref. unit.

Регіони	Консолідовані чинники I^2_{GMLUTI}
Вінницький	2,403
Волинський	2,407
Дніпропетровський	2,176
Донецький	1,613
Житомирський	2,417
Закарпатський	2,52
Запорізький	1,901
Івано-Франківський	2,437
Київський	2,492
Кіровоградський	2,339
Луганський	0,919
Львівський	2,398
Миколаївський	1,889
Одеський	2,316
Полтавський	2,374
Рівненський	2,482
Сумський	2,032
Тернопільський	2,487
Харківський	1,958
Херсонський	1,594
Хмельницький	2,44
Черкаський	2,541
Чернівецький	2,566
Чернігівський	2,462

Висновки. У результаті дослідження сформовано кількісну основу геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів шляхом застосування методу інтегральної оцінки.

Удосконалено типологічну структуру геоекологічного моніторингу ВЗ транспортної інфраструктури регіонів, яка визначається екологічними, земельними і чинниками ТІ, що дозволило побудувати багаторівневу систему показників та сформувати кількісне підґрунтя оцінки рівня застосування ГМ.

Запропоновано метод до оцінки рівня розробки й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів, який на відміну від наявних, базується на застосуванні багаторівневої системи екологічних, земельних і показників транспортної інфраструктури, математичних експертних і аналітичних методів, що надало можливості для виявлення позитивних прогнозних тенденцій узагальнюючого критерію ГМ ВЗ ТІ.

Для реалізації методу до оцінки побудовані консолідовані й інтегральна моделі, які базуються на результатах визначення екологічних, земельних й чинників транспортної інфраструктури.

Перелік посилань

1. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року. Указ Президента України. Документ 722/2019 від 30.09.2019. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text

2. Mamonov K., Viatkin R., Frolov V. Land use monitoring of the regions: geoinformation aspects. Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура. 2023. Том 6. Вип. 180. С. 98–102. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-98-1027

3. Мамонов К. А., Кондращенко О. В., Метешкін К. О. Нестеренко С. Г. Містобудівне забезпечення розробки геоінформаційних моніторингових карт використання нерухомості регіонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2024. Випуск 115. Частина 2. С. 190–198. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/190.pdf

4. Комчатних О. В., Петровська С. І., Редько Н. О. Сучасний стан та перспективи розвитку транспортної інфраструктури в Україні. Причорноморські економічні студії. 2021. Вип. 64. С. 11–16. URL: http://bses.in.ua/journals/2021/64_2021/4.pdf

5. Stempnik P., Czapski G., Kruszyński M. Infrastruktura transportowa w Polsce. Rynek-Społeczeństwo-Kultura. 2018. № 1(27). P. 137–140.

6. 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

7. Перович Л. М., Винарчик Л. В. Кадастровий моніторинг земель. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2009. Вип. 72. URL: http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/7159/1/15.pdf

8. Шарапова С. В. Питання інформаційного забезпечення землекористування та охорони земель. Теорія і практика правознавства. 2014. Вип. 2. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tipp_2014_2_19

9. Іванюта С. П. Екологічні і техногенні загрози у зоні військового конфлікту на сході України. Стратегічна панорама. 2014. № 1. С. 53–60.

10. Jamila M. S., Jamilb M.A., Mazharc A., Ikrama A., Ahmeda A., Munawar U. Smart Environment Monitoring System by Employing Wireless Sensor Networks on Vehicles for Pollution Free Smart Cities. Procedia Engineering. 2015. № 107. Pp. 480–484. URL: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.106

11. Шевченко Р. Ю. Мобільна геоінформаційна система екологічного моніторингу міста Києва як науково-методологічна модель запобігання ризикам антропогенного впливу. Екологічні науки. 2019. № 2(25). С. 55–63. URL: http://www.ecoj.dea.kiev.ua/archives/2019/2/11.pdf

FORMATION OF A QUANTITATIVE BASIS FOR THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF GEO-ECOLOGICAL MONITORING OF LAND USE FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN REGIONS

Vatulia Glib L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: Glib.Vatulia@kname.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-3823-7201

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., Doctor of Economic Sciences, Lecturer at the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail: vasssgoi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1822-4478

Nelin Yevhen O., Postgraduate student of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: zhekanelin@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-8224-3062

Summary. The article addresses the pressing issue of establishing a quantitative basis for the development and application of geo-ecological monitoring of land use in regional transport infrastructure through the use of an assessment method. Environmental, land and transport infrastructure factors are identified and stages are proposed for developing a method for assessing the level of formation and application of geo-ecological monitoring of land use in transport infrastructure. This made it possible to form a quantitative basis for the development and application of geo-ecological monitoring. To implement the assessment method, consolidated and integrated models were developed, which made it possible to determine an integrated indicator of the level of development and application of geo-ecological monitoring of land use in the transport infrastructure of regions. In most regions, there is an insignificant level of formation and application of geo-ecological monitoring of land use in the transport infrastructure. A decrease in the presented integral indicator has been established in frontline regions and regions where hostilities are taking place.

Keywords: geo-ecological monitoring, land use for transport infrastructure, integrated assessment method, local indicators, consolidated environmental, land and transport infrastructure factors, consolidated and integrated models.

References

1. On Ukraine's Sustainable Development Goals for the period up to 2030. Decree of the President of Ukraine. Document 722/2019 dated 30 September 2019. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text [in Ukrainian].

2. Mamonov, K., Viatkin, R., Frolov, V. (2023) Land use monitoring of the regions: geoinformation aspects. Municipal Economy of Cities. Series: Engineering Sciences and Architecture. Volume 6. Issue 180. Pp. 98–102. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-98-1027 [in Ukrainian].

3. Mamonov, K., Kondrashchenko, O., Meteshkin, K., Nesterenko, S. (2024) Urban planning support for the development of geoinformation monitoring maps of real estate in regions. Automobile roads and road construction. Issue 115. Part 2. Pp. 190–198. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/190.pdf [in Ukrainian].

4. Komchatnykh, O., Petrovska S., Redko N. (2021) Current state and prospects for the development of transport infrastructure in Ukraine. Black Sea Economic Studies. Issue 64. Pp. 11–16. http://bses.in.ua/journals/2021/64_2021/4.pdf [in Ukrainian].

5. Stempnik, P., Czapski, G., Kruszyński, M. (2018) Transport infrastructure in Poland. Market-Society-Culture. №. 1(27). Pp. 137–140.

6. Bubir, N., Prasul, Y., Kulish, S., Bachurina, D. (2023) Monitoring land use by local communities in Ukraine under martial law. Problems of continuous geographical education and cartography. Issue 37. pp. 7–15. https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/23635/21539 [in Ukrainian].

7. Perovich, L., Vinarchik, L. (2009) Cadastral monitoring of land. Geodesy, cartography and aerial photography. Issue 72. http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/7159/1/15.pdf [in Ukrainian].

8. Sharapova, S. (2014) Issues of information support for land use and land protection. Theory and practice of jurisprudence. Issue 2. http://nbuv.gov.ua/UJRN/tipp_2014_2_19 [in Ukrainian].

9. Ivanyuta, S. (2014) Ecological and technogenic threats in the zone of military conflict in eastern Ukraine. Strategic Panorama. № 1. Pp. 53–60.

10. Jamila, M., Jamilb, M., Mazharc, A., Ikrama, A., Ahmeda, A., Munawar, U. (2015) Smart Environment Monitoring System by Employing Wireless Sensor Networks on Vehicles for Pollution Free Smart Cities. Procedia Engineering. № 107. Pp. 480–484. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.106

Shevchenko, R. (2019) Mobile geographic information system for environmental monitoring of the city of Kyiv as a scientific and methodological model for preventing the risks of anthropogenic impact. Ecological Sciences. № 2(25). Pp. 55–63. URL: http://www.ecoj.dea.kiev.ua/archives/2019/2/11.pdf [in Ukrainian].

УДК 528:004.65:332.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-124-128**
UDC 528:004.65:332.3

ГЕОДЕЗИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ

GEODETIC SUPPORT FOR LAND USE IN REGIONS



Канівець Олена Миколаївна, *доктор філософії за спеціальністю «Геодезія та землеустрій», доцент кафедри геодезії та землеустрою, Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна, e-mail: leva1205@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0002-9597-6617



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

Анотація. Тема дослідження щодо формування й застосування геодезичного забезпечення використання земель регіонів є актуальною і має важливого значення для розвитку регіонів.

У роботі досягнута мета дослідження щодо виявлення особливостей формування й застосування геодезичного забезпечення використання земель регіонів.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання: формування просторової інформації для геодезичного забезпечення використання земель регіонів; визначення напрямів та виокремлення особливостей формування геодезичного забезпечення використання земель.

У результаті дослідження запропоновано комплексні заходи для формування геодезичного забезпечення використання земель, що надає можливості створити просторове підґрунтя для здійснення моніторингових процедур і формування геоінформаційної системи землекористування на регіональному рівні.

При здійсненні геодезичних робіт формується відповідне нормативно-правове й інструментальне забезпечення, що дозволяє інформацію супутникової геодезії, реалізувати математичну обробку геодезичних даних, для формування просторового розвитку складних територіальних систем.

Ключові слова: геодезичне забезпечення, використання земель, просторове забезпечення, математична обробка геодезичних даних, супутникова геодезія, складні системи.

Вступ. Земельні ресурси є важливими для функціонування держави, регіонів, територіальних громад. У сучасних умовах вони забезпечують територіальний розвиток і створюють умови для підвищення якості життєдіяльності населення. За останні роки спостерігається зниження ефективності використання земельних ресурсів, скорочення рівня нормативної грошової оцінки, потенційних можливостей землекористування. Поглиблюють представлені процеси наслідки бойових агресивних дій. Для вирішення визначених складних питань виникає необхідність зростання повноти, релевантності, достовірності просторового забезпечення використання земель регіонів на основі формування й застосування геодезичного забезпечення.

Таким чином, тема дослідження щодо формування й застосування геодезичного забезпечення використання земель регіонів є актуальною і має важливого значення для розвитку регіонів.

Огляд існуючих теоретичних розробок. У наукових розробках розглядаються питання проведення геодезичних досліджень для забезпечення використання земель [1–3].

Для формування й використання геодезичного забезпечення використання земель регіонів виокремлюються напрями та особливості застосування геодезичного інструментарію. У цьому контексті слід відзначити роботи [4–7].

Геодезичне забезпечення спрямовується для створення й застосування геопросторових систем і подальшого створення геоінформаційного моніторингу, що формує підґрунтя для контролю та ефективності землекористування. Проблемні питання відносно формування й застосування геопросторового забезпечення представлені у роботах [8–10].

Розроблено та застосовується нормативно-правове забезпечення щодо проведення геодезичних робіт та використання геодезичного інструментарію: Закони України «Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність», «Про національну інфраструктуру геопросторових даних», Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування», «Деякі питання функціонування Державного картографо-геодезичного фонду України», «Про утворення Ради з національної інфраструктури геопросторових даних», «Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних», «Про затвердження Порядку ведення державного обліку топографогеодезичних і картографічних робіт», Директива Європейського Парламенту і Ради 2007/2/ЄС «Про створення Інфраструктури просторової інформації у Європейському Співтоваристві (INSPIRE)», Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України «Технічні вимоги до специфікацій геопросторових даних національної інфраструктури геопросторових даних».

Поряд з цим, залишаються невирішеними питання формування та застосування геодезичного забезпечення, враховуючи напрями й особливості комплексного формування геоінформаційного моніторингового середовища.

Метою дослідження є виявлення особливостей формування й застосування геодезичного забезпечення використання земель регіонів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання:

– формування просторової інформації для геодезичного забезпечення використання земель регіонів;

– визначення напрямів та виокремлення особливостей формування геодезичного забезпечення використання земель.

Виклад основного матеріалу. Формування геодезичного забезпечення використання земель здійснюється за відповідними напрямами. На першому етапі обґрунтовуються загальні відомості про об'єкт. На другому етапі здійснюються та обробляються результати топографо-геодезичних робіт. У результаті збору та аналізу топографо–геодезичних матеріалів встановлено, що в районі виконання робіт, зокрема, існують топографічні карти масштабу 1:10000 та 1:100 000, ортофотоплани та супутникові знімки, які були досліджені в районі виконання робіт перед початком вишукувань. Визначаються види робіт, рекогностування території зйомки, визначаються координати пунктів за допомогою GPS, здійснюється топографічна зйомка (лінійні вишукування), погодження матеріалів зйомки з експлуатуючими організаціями та власниками.

Геодезичні роботи виконані згідно «Інструкції з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500» (ГКНТА-2.04-02-98) у системі координат. Знімання виконувались електронним тахеометром з точок планово-висотного обґрунтування. Їх координати вимірювались за допомогою GPS приймача статичним методом для забезпечення належної точності вимірювань (точність вимірювання 5", середня квадратична похибка при вимірюванні віддалей не перевищує [2+2•10-6•D] мм (із використанням відбивача), ціна найменшого розряду за індикації кутів - 5", ціна найменшого розряду за індикації віддалей – 1 мм). Прив'язка здійснювалася до пунктів державної геодезичної мережі (використані розробником відомості Державного картографо-геодезичного фонду, відповідно до виписки координат та висот пунктів ДГМ із Банку геодезичних даних Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ГЕОДЕЗІЇ І КАРТОГРАФІЇ). Розходження значень кутів між напівприйомами не перевищували 5 секунд. Центрування інструменту та візирних цілей виконувалось за допомогою оптичного центриру з точністю 3 мм. В умовах обмеженої видимості застосовуються методи створних точок, кутових засічок та лінійних промірів з застосуванням рулетки. Точки знімання закріплені тимчасовими знаками. Обробка геодезичних даних виконувалася на персональному комп'ютері за допомогою програмних комплексів. В процесі виконання робіт визначаються правила техніки безпеки.

Для знімання в масштабі 1:500 на об'єкті створено планово-висотну геодезичну мережу, яка складається з знімальних станцій. Тахеометрична зйомка виконується у масштабі 1:500.

Роботи здійснюються для стадії робочого проектування відповідно до інструкції по топографічних зйомках в масштабах 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98). У результаті виконання топографічної зйомки складений план в масштабі 1:500, який викреслений в «Умовних знаках для топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500» Міністерства екології та природних ресурсів України.

Прийомка виконаних робіт здійснюється камеральним шляхом зрівнювання плану та абрисів зйомки, контролю вирахування дирекційних кутів, горизонтальних прокладень, прирощення координат, перевищень та відміток точок, складання польових журналів та їх правильного заповнення. Контроль, прийняття та оцінка якості топографо-геодезичних вишукувань проведені при виконанні кожної операції в процесі робіт, а також по готових до здачі замовнику матеріалах робіт.

Висновки. У результаті дослідження запропоновано комплексні заходи для формування геодезичного забезпечення використання земель, що надає можливості створити просторове підґрунтя для здійснення моніторингових процедур і формування геоінформаційної системи землекористування на регіональному рівні.

При здійсненні геодезичних робіт формується відповідне нормативно-правове й інструментальне забезпечення, що дозволяє інформацію супутникової геодезії, реалізувати математичну обробку геодезичних даних, для формування просторового розвитку складних територіальних систем.

Перелік посилань

1. Кухар М.А., Доброходова О.В., Євдокімов А.А., Мироненко М.Л. Порівняльний аналіз сучасних електронних геодезичних приладів. Комунальне господарство міст. Серія «Технічні науки та архітектура». 2021. Вип. 4 (164). С. 117–121. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/uk/article/view/5829/5748

2. Кисельов Ю.О., Поліщук В.В., Рудий Р.М., Боровик П.М., Кисельова О.О., Удовенко І.О. Методологія та організація наукових досліджень у геодезії та землеустрої: навч. посіб. Умань: Видавець «Сочінський М. М.», 2024. 177 с. URL: https://dspace.luguniv.edu.ua/xmlui/handle/123456789/10184

3. Наливайко Т., Наливайко Т., Казаченко Д. Обґрунтування системи геодезичного моніторингу із використанням рейки змінної довжини. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2021. Вип. I(41). С. 68–73. URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/11.pdf

4. Горб А., Тревого І. Інноваційні цифрові технології в геодезії та геоінформатиці на першому online INTERGEO 2020. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2021. Вип. I (41). С. 16–22. URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/3.pdf

5. Лазоренко Н.Ю. Дослідження застосування штучного інтелекту (GEOAI) для завдань топографічного картографування. Просторовий розвиток. 2024. Вип. 8. С. 430–443. URL: http://spd.knuba.edu.ua/article/view/315533

6. Xiaoyan W., Jingjing Y., Ming H., Zixiao P. GNSS interference and spoofing dataset. Data in Brief. 2024. Vol. 54. P. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110302

7. Мамонов К.А., Штерндок Е.С., Нестеренко С.Г., Радзінська Ю.Б., Касьянов В.В. Формування сучасної системи геодезичного забезпечення використання земель із застосуванням БПЛА та фотограмметричних методів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2024. Вип. 116. Ч. 1. С. 148–160. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.1/148.pdf

8. Мамонов К.А., Радзінська Ю.Б., Фролов В.О., Євдокімов А.А., Штерндок Е.С. Застосування геоінформаційних систем і технологій у містобудівному моніторингу територіальних громад: теоретичні засади. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2025. Вип. 117. Ч. 2. С. 213–219. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.2/213.pdf

9. Мамонов К.А., Гой В.В., Харів В.В. ГІС у системі геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2025. Вип. 213. С. 92–101. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_213-doi.pdf

10. Mamonov K., Bieliatynskyi A., Gryanyk V., Kanivets O., Kovalenko L. Geospatial modeling of directions for the development and implementation of the land administration system at the regional level. Civil and Environmental Engineering. 2025. Vol. 0. Issue 0. DOI: https://doi.org/10.2478/cee-2025-0072

GEODETIC SUPPORT FOR LAND USE IN REGIONS

Kanivets Olena M., Doctor of Philosophy in Geodesy and Land Management, Associate Professor of the Department of Geodesy and Land Management, Sumy National Agrarian University, e-mail: leva1205@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-9597-6617

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

Summary. The topic of research on the formation and application of geodetic support for land use in regions is relevant and important for regional development.

The study achieved its goal of identifying the characteristics of the formation and application of geodetic support for land use in regions.

To achieve this goal, the following tasks were solved: the formation of spatial information for geodetic support for land use in regions; the determination of directions and the identification of characteristics of the formation of geodetic support for land use.

As a result of the study, comprehensive measures for the formation of geodetic support for land use are proposed, which provides opportunities to create a spatial basis for monitoring procedures and the formation of a geoinformation system for land use at the regional level.

When carrying out geodetic work, the appropriate regulatory, legal and instrumental support is formed, which allows the information of satellite geodesy to be used to perform mathematical processing of geodetic data for the formation of spatial development of complex territorial systems.

Keywords: geodetic support, land use, spatial support, mathematical processing of geodetic data, satellite geodesy, complex systems.

References

1. Kukhar, M., Dobrokhodova, O., Yevdokimov, A., Mironenko, M. (2021) Comparative analysis of modern electronic geodetic instruments. Municipal Economy of Cities. Series «Technical Sciences and Architecture». Issue 4 (164). P. 117–121. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/uk/article/view/5829/5748 [in Ukrainian].

2. Kiselov, Yu., Polishchuk, V., Rudiy, R., Borovik, P., Kiselova, O., Udovenko, I. (2024) Methodology and organisation of scientific research in geodesy and land management: textbook. Uman: Publisher «Sochinsky M.M.», 177 p. https://dspace.luguniv.edu.ua/xmlui/handle/123456789/10184 [in Ukrainian].

3. Nalyvaiko, T., Nalyvaiko, T., Kazachenko, D. (2021) Justification of a geodetic monitoring system using a variable-length rail. Modern achievements in geodetic science and production. Issue I(41). Pp. 68–73. https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/11.pdf [in Ukrainian].

4. Gorb, A., Trevogo, I. (2021) Innovative digital technologies in geodesy and geoinformatics at the first online INTERGEO 2020. Modern achievements in geodesy science and production. Issue I (41). Pp. 16–22. https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/3.pdf [in Ukrainian].

5. Lazorenko, N. (2024) Research on the application of artificial intelligence (GEOAI) for topographic mapping tasks. Spatial Development. Issue 8. Pp. 430–443. http://spd.knuba.edu.ua/article/view/315533 [in Ukrainian].

6. Xiaoyan, W., Jingjing, Y., Ming, H., Zixiao, P. (2024) GNSS interference and spoofing dataset. Data in Brief. Vol. 54. P. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110302

7. Mamonov, K., Shternok, E., Nesterenko, S., Radzinska, Yu., Kasyanov, V. (2024) Formation of a modern system of geodetic support for land use with the application of UAVs and photogrammetric methods. Automobile roads and road construction. Issue 116. Part 1. Pp. 148–160. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.1/148.pdf [in Ukrainian].

8. Mamonov, K., Radzinska, Y., Frolov, V., Yevdokimov, A., Shterndok, E. (2025) Application of geographic information systems and technologies in urban planning monitoring of territorial communities: theoretical foundations. Automobile roads and road construction. Issue 117. Part 2. pp. 213–219. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.2/213.pdf [in Ukrainian].

9. Mamonov, K., Goi, V., Khariv, V. (2025) GIS in the system of geospatial monitoring of land use for residential and public development in regions. Collection of scientific works of UkrDUTZ. Issue 213. P. 92–101. https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_213-doi.pdf [in Ukrainian].

10. Mamonov, K., Bieliatynskyi, A., Gryanyk, V., Kanivets, O., Kovalenko, L. (2025) Geospatial modeling of directions for the development and implementation of the land administration system at the regional level. Civil and Environmental Engineering. Vol. 0. Issue 0. https://doi.org/10.2478/cee-2025-0072

UDC 528:332.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-129-137**
УДК 528:332.3

MATHEMATICAL MODELLING OF THE NORMATIVE MONETARY VALUATION LEVEL AT THE REGIONAL LEVEL

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РІВНЯ НОРМАТИВНОЇ ГРОШОВОЇ ОЦІНКИ НА РЕГІОНАЛЬНОМУ РІВНІ



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, Ukraine, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com*

http://orcid.org/0000-0002-0797-2609



Goi Vasyl V., *Doctor of Economic Sciences, Lecturer at the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail: vasssgoi@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0003-1822-4478



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*

https://orcid.org/0000-0003-1107-7401



Voronkov Oleksii O., *Candidate of Economic Sciences, Docent of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail:* voronkov.oleksii@kname.edu.ua

https://orcid.org/0000-0001-6905-0098

Abstract. A pressing issue is to determine the impact of regional development factors on the level of normative monetary valuation based on the application of mathematical modelling tools.

The study achieved its goal of determining the impact of factors on the level of normative monetary valuation of land using mathematical modelling tools to develop measures to improve land use efficiency. The following tasks were accomplished: determining the level of normative monetary valuation of land at the regional level; characterising the factors that influence the formation and use of normative monetary valuation; developing mathematical models of the impact of factors on the level of normative monetary valuation of regions.

As a result of the study, the low impact of the level of land use and investment attractiveness on the formation of the normative monetary valuation was determined. This is due to ambiguous trends in the formation and application of the investment attractiveness of land, a decline in investment activity and the attitude of domestic and international investors, a reduction in the level of land use efficiency, and the growing impact of aggressive military actions. Based on this, it is necessary to develop and implement measures to increase the normative monetary valuation of land and, in the sphere of its application, to implement measures aimed at increasing the investment attractiveness of land and the level of its efficient use.

Key words: land use, mathematical modelling, mathematical processing of geodetic data, collection of satellite geodesy data, mathematical models, assessment, normative monetary valuation of land, investment attractiveness, complex systems.

Introduction. The formation of a modern land use system at the regional level depends on the established quantitative basis, which is built on the results of assessment procedures. In this context, the relevant issue is the determination of land use indicators, which are determined by normative monetary valuation. It should be noted that in order to carry out this assessment, information, analytical and spatial support is formed on the basis of the results of the assessment of factors obtained, including from the results of mathematical processing of geodetic data and satellite imagery.

It should be noted that in recent years, which have been marked by a decline in land use efficiency, the negative impact of external and internal factors, and the consequences of hostilities, there has been a slowdown in the processes of normative monetary valuation at the regional level.

Thus, the relevant issue is to establish the impact of regional development factors on the level of normative monetary valuation as a complex system based on the application of mathematical modelling tools.

Review of existing theoretical developments. The procedure for determining the normative monetary valuation and the categorical apparatus are presented in the Law of Ukraine «On Land Valuation» and the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On Approval of the Methodology for the Normative Monetary Valuation of Land Plots». Problematic issues of forming and implementing the normative monetary valuation of land are highlighted in works [1, 2]. Functional aspects and features of the implementation of the normative monetary valuation of land are presented in [3–5].

The factors influencing the formation and application of normative monetary valuation of land are determined by the following parameters: spatial, functional, urban planning, environmental, economic and social, investment and innovation.

The identified factors are characterised in the studies [6, 7].

To assess the presented factors and determine the cause-and-effect relationships between them, mathematical modelling tools are used, the significance of which is determined in the studies [8–15].

At the same time, issues remain unresolved regarding the formation and identification of factors that influence the normative monetary valuation of land and the establishment of causal relationships between them for making informed decisions in the field of land use.

The aim of the study is to determining the impact of factors on the level of normative monetary valuation of land using mathematical modelling tools to develop measures to improve land use efficiency. To achieve this goal, the following tasks are set:

– determining the level of normative monetary valuation of land at the regional level;

– characterising the factors that influence the formation and use of normative monetary valuation;

– developing mathematical models of the impact of factors on the level of normative monetary valuation of regions.

Presentation of the main material. The level of normative monetary valuation of land (R_{ngl}) according to the State Statistics Service of Ukraine on Geodesy, Cartography and Cadastre is specified in Table 1.

Table 1 *– Level of normative monetary valuation of land according to [16]*
Таблиця 1 *– Рівень нормативної грошової оцінки земель за [16]*

Regions	The significance of the monetary valuation of land
Vinnytsia	0,39
Volyn	0,328
Dnipropetrovsk	0,112
Donetsk	0,812
Zhytomyr	0,679
Zakarpattia	0,691
Zaporizhzhia	0,019
Ivano-Frankivsk	0,803
Kyiv	0,62
Kirovograd	0,42
Luhansk	0,551
Lviv	0,4
Mykolaiv	0,029
Odesa	0,644
Poltava	0,348
Rivne	0,976
Sumy	0,469
Ternopil	0,367
Kharkiv	0,154
Kherson	0,367
Khmelnytskyi	0,367
Cherkasy	0,616
Chernivtsi	0,813
Chernihiv	0,606

The study found that the highest normative monetary valuation levels are found in the following regions: Donetsk, Ivano-Frankivsk, Rivne.

At the same time, this indicator is low in the following regions: Dnipropetrovsk, Zaporizhia, Mykolaiv, Kharkiv.

Overall, the normative monetary valuation of land is determined at insignificant or moderate levels.

The level of normative monetary valuation of land is influenced by factors such as land use (L_1) and investment attractiveness (L_2) (Fig. 1–2).

Low levels of land use were found in the Luhansk, Donetsk, Zaporizhia and Kherson regions. Significant levels were found in the Dnipropetrovsk, Kyiv, and Lviv regions. Most regions have moderate levels of land use.

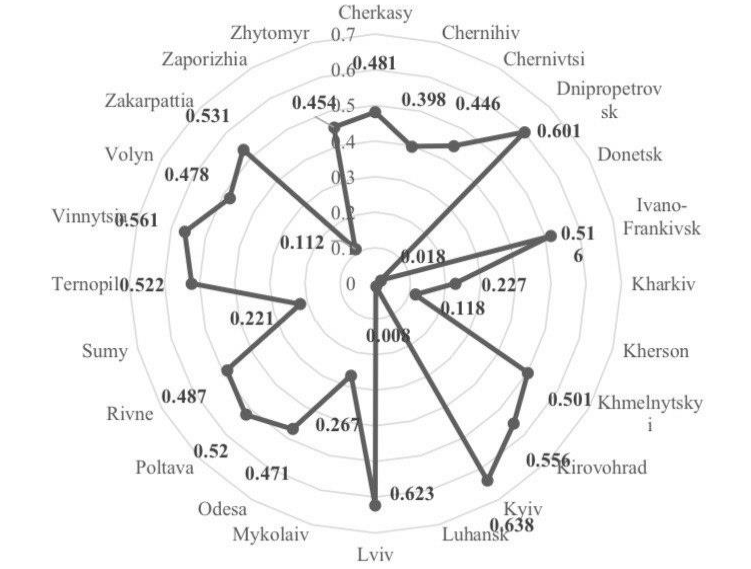


Figure 1 *– Level of land use by region, relative units (according to the authors)*
Рисунок 1 *– Рівень використання земель за регіонами, відн. од. (за даними авторів)*

The level of investment attractiveness of land is shown in Fig. 2.

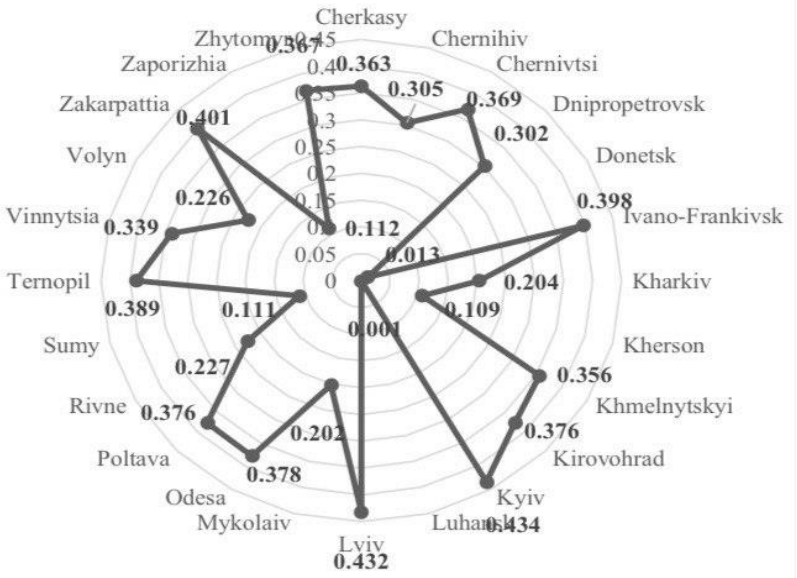


Figure 2 *– Level of investment attractiveness of land by region, relative units (according to the authors)*
Рисунок 2 *– Рівень інвестиційної привабливості земель за регіонами, відн. од. (за даними авторів)*

In most regions, there is a decline in the investment attractiveness of land at the regional level, which is determined by insignificant values.

Using mathematical modelling tools, parameters were determined and mathematical models were constructed to show the impact of the factors presented on the normative monetary valuation of land in the regions.

The parameters of mathematical modelling of the impact of land use on the normative monetary valuation are presented in Fig. 3.

Correlation analysis

Correlation table

Variable		Rngl	L1
1. Rngl	Pearson's correlation (r)	—	
	p	—	
	Lower 95% CI	—	
	Upper 95% CI	—	
	Spearman's correlation (rho)	—	
	p	—	
	Lower 95% CI	—	
	Upper 95% CI	—	
	Kendall's Tau B	—	
	p	—	
	Lower 95% CI	—	
	Upper 95% CI	—	
	Covariance	—	
2. L1	Pearson's correlation (r)	0.133	—
	p	0.534	—
	Lower 95% CI	-0.285	—
	Upper 95% CI	0.509	—
	Spearman's correlation (rho)	0.021	—
	p	0.923	—
	Lower 95% CI	-0.386	—
	Upper 95% CI	0.421	—
	Kendall's Tau B	0.033	—
	p	0.823	—
	Lower 95% CI	-0.258	—
	Upper 95% CI	0.324	—
	Covariance	0.006	—

Testing assumptions

Shapiro-Wilk Test for Multivariate Normality

Shapiro-Wilk criterion	p
0.922	0.028

The Shapiro-Wilk criterion for assessing two-dimensional normality

			Shapiro-Wilk criterion	p
Rngl	-	L1	0.922	0.028

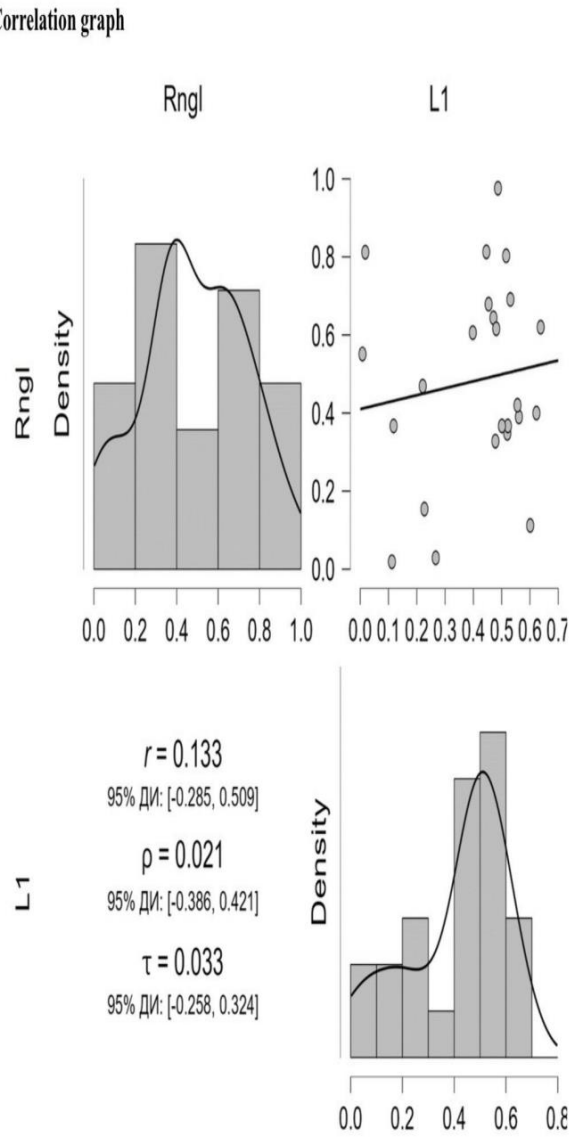


Figure 3 *– Results of mathematical modelling of the impact of land use on the normative monetary valuation indicator at the regional level, obtained using the JASP* software package, ref. unit (developed by the authors)*

Рисунок 3 *– Результати математичного моделювання впливу рівня використання земель на показник нормативної грошової оцінки на регіональному рівні, отримані із застосуванням програмного комплексу JASP*, відн. од. (розроблено авторами)*

The mathematical apparatus of the Statistica software package is used to construct the model, the results of which are presented in Fig. 4.

N=24	Regression Summary for Dependent Variable: Rngl (Spreadsheet1) R= 0,133 R^2= 0,018 F(1,22) = 0,4					
	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(22)	p-value
Intercept			0,41	0,126	3,247	0,004
L_1	0,133	0,211	0,18	0,282	0,632	0,534

Figure 4 *– Parameters of the mathematical model of the dependence of the normative monetary valuation of land on the level of land use at the regional level, relative units (developed by the authors)*

Рисунок 4 *– Параметри математичної моделі залежності рівня нормативної грошової оцінки земель від рівня використання земель на регіональному рівні, відн. од. (розроблено авторами)*

Thus, a mathematical model has been developed to determine the dependence of the normative monetary valuation of land on the level of land use at the regional level:

$$R_{ngl}=0,41+0,18*L_1. \quad (1)$$

The parameters of mathematical model (1) indicate that the level of land use has little impact on the normative monetary valuation of land. This is due to the decline in land use efficiency, internal imbalances in land relations at the regional level, and the growing influence of other factors, particularly security factors.

Using Excel software, a model was developed to show the impact of the level of investment attractiveness of land on the normative monetary valuation of land (Fig. 5).

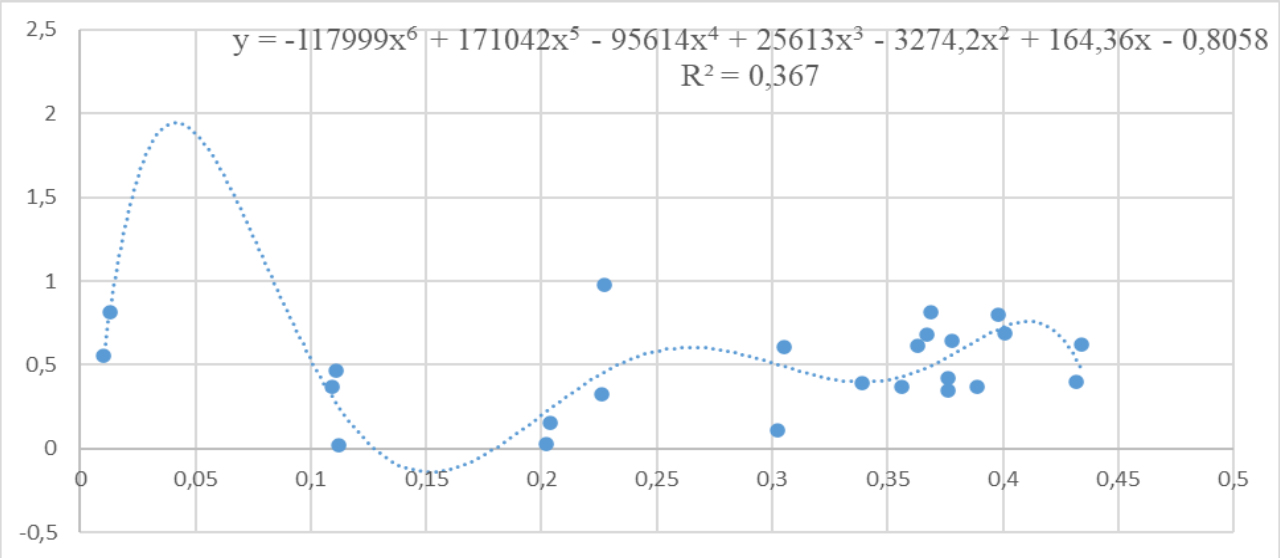


Figure 5 *– Mathematical model of the impact of land investment attractiveness on the normative monetary valuation of land, relative units.*

Рисунок 5 *– Математична модель впливу рівня інвестиційної привабливості земель на нормативну грошову оцінку земель, відн. од.*

Conclusion. Thus, the study found that land use and investment attractiveness have little impact on the formation of the normative monetary valuation. This is due to ambiguous trends in the formation and application of land investment attractiveness, a decline in investment activity and the attitude of domestic and international investors, a reduction in the level of land use efficiency, and the growing impact of aggressive military operations. Based on this, it is necessary to develop and implement measures to increase the normative monetary valuation of land and, in the area of its application, to implement measures aimed at increasing the investment attractiveness of land and the level of its efficient use.

References

1. Dehtyarenko, Yu., Mantskevich, Yu., Palekha, Yu., Tarnopolsky, A. (2008) The impact of monetary valuation on the land market in Kyiv: status, problems and prospects for development. Land Management and Cadastre. № 1. Pp. 59–68.
2. Paleha, Yu. (2006) Economic and geographical aspects of determining the value of populated areas. Kyiv: PROFI, 340 p.
3. On land management. Law of Ukraine dated 22.05.2003 № 858-IV. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text [in Ukrainian].
4. On approval of the Procedure for maintaining the State Land Cadastre. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 17.10.2012 № 1051. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-%D0%BF#Text [in Ukrainian].
5. Procedural features of determining the normative monetary value of a separate land plot outside populated areas. https://www.decentralization.ua/news/18427?page=5 [in Ukrainian].
6. Reydon, B.P., Agurto Plata, L.E., Sparovek, G., Burstein, Goldszmidt R.G., Telles, T.S. (2014) Determination and forecast of agricultural land prices. Nova Economia. vol. 24. № 2. Pp. 389–408. https://www.scielo.br/j/neco/a/SzsPnLwPB7pjK9RpXfcWW7y/?lang=en
7. Pankiv, Z., and Yamelnyts, T. (2021) Normative monetary valuation of land in Ukraine: a study guide. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 344 p. https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/03/Normatyvna-oc-zemel-Pankiv-YAmelynets-2021.pdf [in Ukrainian].
8. Mamonov, K., Viatkin, R., Chaika, T. (2025) Mathematical modelling of factors influencing industrial land use in regions. Scientific Bulletin of Construction. Issue № 112. pp. 362–368. https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1898/1819 [in Ukrainian].
9. Mamonov, K., Shtendok, E., Goi, V., Radzinska, Yu. (2025) Mathematical modelling of factors affecting the efficiency of land use in regions. Highways and Road Construction. Issue 117. Part 1. Pp. 157–165. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.1/157.pdf [in Ukrainian].
10. Mamonov, K., Goi, V., Viatkin, R., Tishchenko, A. (2025) Mathematical modelling as a tool used for real estate market analysis. Municipal Economy of Cities. Vol. 1. Issue 189. Pp. 296–300. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6480/6400 [in Ukrainian].
11. Mamonov, K., Goi, V., Viatkin, R., Mamonov, V. (2025) Characteristics of mathematical methods and models for real estate market analysis. Municipal Economy of Cities. Volume 1. Issue 189. pp. 291–295. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6479/6399 [in Ukrainian].
12. Mamonov, K., Goi, V., Viatkin, R. (2025) Mathematical modelling of the impact of the normative monetary valuation of land on the index of changes in the ratio of area to population by region. Municipal Economy of Cities. Volume 1. Issue 189. P. 285–290. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6478/6398 [in Ukrainian].
13. Mamonov, K., Meteshkin, K., Goi, V., Viatkin, R. (2024) Mathematical modelling of factors influencing the functioning of complex systems of territorial development of land use in regions. Municipal Economy of Cities. Volume 6. Issue 187. Pp. 180–184. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6404/632 [in Ukrainian].

14. Mamonov, K., Viatkin, R., Sternok E.S., Shtendok, A. (2024) Mathematical modelling of factors influencing the use of land in nature reserve areas in regions. Municipal Economy of Cities. Volume 1. Issue 182. pp. 132–136. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-132-136 [in Ukrainian].
15. Mamonov, K., Pilicheva, M., Frolov, V., Viatkin, R., Voitenko, O. (2024) Mathematical modelling of geospatial development indicators for territorial communities. Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology. Volume 9. №3. Pp. 287–292. https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-3-50 [in Ukrainian].
16. Official website of the State Statistics Service of Ukraine on geodesy, cartography and cadastre. https://land.gov.ua [in Ukrainian].

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РІВНЯ НОРМАТИВНОЇ ГРОШОВОЇ ОЦІНКИ НА РЕГІОНАЛЬНОМУ РІВНІ

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, доктор економічних наук, викладач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: vasssgoi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1822-4478

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

Воронков Олексій Олександрович, кандидат економічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: voronkov.oleksii@kname.edu.ua, https://orcid.org/0000-0001-6905-0098

Анотація. Актуальним питанням є встановлення впливу чинників регіонального розвитку на рівень нормативної грошової оцінки на основі застосування інструментарію математичного моделювання.

У роботі досягнута мета дослідження відносно встановлення впливу чинників на рівень нормативної грошової оцінки земель із застосуванням інструментарію математичного моделювання для розробки заходів підвищення ефективності землекористування. Вирішені поставлені завдання: визначення рівня нормативної грошової оцінки земель на регіональному рівні; характеристика чинників, що впливають на формування та використання нормативної грошової оцінки; розробка математичних моделей впливу чинників на рівень нормативної грошової оцінки регіонів.

У результаті дослідження визначено низький вплив рівня використання земель та інвестиційної привабливості на формування нормативної грошової оцінки. Це пов’язано із неоднозначними тенденціями, що відбуваються у сфері формування та застосування інвестиційної привабливості земель, зниженням інвестиційної активності та відношення вітчизняних і міжнародних інвесторів, скороченням рівня ефективності використання земель, зростанням впливу наслідків агресивних бойових дій. Виходячи з цього, необхідно розробляти та реалізувати заходи до зростання нормативної грошової оцінки земель і в сфері її застосування здійснити напрями спрямовані на збільшення інвестиційної привабливості земель, рівня ефективності їх використання.

Ключові слова: використання земель, математичне моделювання, математична обробка геодезичних даних, збір даних супутникової геодезії, математичні моделі, оцінка, нормативна грошова оцінка земель, інвестиційна привабливість, складні системи.

Перелік посилань

1. Дехтяренко Ю.Ф., Манцевич Ю.М., Палеха Ю.М., Тарнопольский А.В. Вплив грошової оцінки на ринок земель у Києві: стан, проблеми та перспективи розвитку. Землеустрій і кадастр. 2008. №1. С. 59–68.
2. Палеха Ю.М. Економіко-географічні аспекти формування вартості територій населених пунктів. К.: ПРОФІ, 2006. 340 с.
3. Про землеустрій. Закон України від 22.05.2003 №858-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text
4. Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру. Постанова Кабінету Міністрів України від 17.10.2012 №1051. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-%D0%BF#Text
5. Процедурні особливості визначення нормативної грошової оцінки окремої земельної ділянки за межами населених пунктів. URL: https://www.decentralization.ua/news/18427?page=5
6. Reydon B.P., Agurto Plata L.E., Sparovek G., Burstein Goldszmidt R.G., Telles T.S. Determination and forecast of agricultural land prices. Nova Economia. 2014. vol. 24. № 2. Pp. 389–408. URL: https://www.scielo.br/j/neco/a/SzsPnLwPB7pjK9RpXfcWW7y/?lang=en
7. Паньків З., Ямелинець Т. Нормативна грошова оцінка земель в Україні : навчальний посібник. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2021. 344 с. URL: https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/03/Normatyvna-oc-zemel-Pankiv-YAmelynets-2021.pdf
8. Мамонов К.А., В'яткін Р.С., Чайка Т.М. Математичне моделювання чинників використання земель промисловості регіонів. Науковий вісник будівництва. 2025. Вип. № 112. С. 362–368. URL: https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1898/1819
9. Мамонов К.А., Штерндок Е.С., Гой В.В., Радзінська Ю.Б. Математичне моделювання чинників ефективності використання земель регіонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2025. Вип. 117. Ч. 1. С. 157–165. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.1/157.pdf
10. Мамонов К.А., Гой В.В., Вяткін Р.С., Тіщенко А.Г. Математичне моделювання як інструментарій, що застосовується для аналізу ринку нерухомості. Комунальне господарство міст. 2025. Том 1. Вип. 189. С. 296–300. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6480/6400
11. Мамонов К.А., Гой В.В., Вяткін Р.С., Мамонов В.К. Характеристика математичних методів і моделей для аналізу ринку нерухомості. Комунальне господарство міст. 2025. Том 1. Вип. 189. С. 291–295. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6479/6399
12. Мамонов К.А., Гой В.В., Вяткін Р.С. Математичне моделювання впливу рівня нормативної грошової оцінки земель на індекс змін показника відношення площі до чисельності населення за регіонами. Комунальне господарство міст. 2025. Том 1. Вип. 189. С. 285–290. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6478/6398
13. 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. 2024. Том 6. Вип. 187. С. 180–184. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6404/632
14. 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. 2024. Том 1. Вип. 182. С. 132–136. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-132-136.
15. 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
16. Офіційний сайт Державної служби статистики України з питань геодезії, картографії та кадастру. URL: https://land.gov.ua

UDC 528:004.65:332.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-138-147**
УДК 528:004.65:332.3

GEOINFORMATION SUPPORT FOR SOIL CONDITION IN THE TERRITORIAL ORGANISATION SYSTEM

ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАНУ ҐРУНТІВ У СИСТЕМІ ОРГАНІЗАЦІЇ ТЕРИТОРІЙ



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, Ukraine, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com*

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, Ukraine, e-mail: frolgis@gmail.com*

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, Ukraine, 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, Ukraine, e-mail: akim050776@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-7538-8922

Abstract. The article proves the relevance and achieves the goal of forming directions for the development and implementation of geoinformation support for soil conditions in the system of territorial organisation. The following tasks have been solved: identification of factors characterising soil conditions in the system of territorial organisation; determination of geoinformation support for soil conditions in the system

of territorial organisation; characterisation of directions for the development and implementation of geoinformation support for soil conditions in the system of territorial organisation.

To study the state of soils and ensure geospatial mapping, a theoretical and methodological platform for soil science has been built. The current state of soils is determined by the growth of negative influences on them, mechanical, physical, and military factors, which leads to a decrease in the quality of land resources.

The condition and use of soils in the system of territorial organisation is influenced by a system of factors: spatial, functional, environmental, technological, organisational, and investment. An assessment of the factors and an integral indicator of the level of formation of geoinformation support for soil condition in the system of territorial organisation by region was carried out. The study found that organisational factors have the greatest impact on the level of geoinformation support for soil condition in the system of territorial organisation by region. The highest values of this indicator were found in the Kyiv and Lviv regions.

The assessment revealed an insignificant level of formation of geoinformation support for soil condition in the system of territorial organisation by region. The lowest values of the generalising criterion were determined in the Donetsk and Luhansk regions, which is due to the impact of the Russian Federation's aggression. In addition, the value of the integral indicator indicates a low level of research, information provision, and the use of geoinformation systems to characterise soil conditions in the system of territorial organisation by region. Geoinformation provision on soil conditions in the system of territorial organisation by region has been developed.

Key words: soil science, geographic information systems, geographic information support, geospatial data infrastructure, soil types, land use planning, factor assessment, monitoring.

Introduction. The use of modern information systems and technologies is changing the paradigm of land relations and the directions of land resource use. In particular, in recent years, the importance and level of application of geographic information systems (GIS) and technologies has been growing, and a geospatial data infrastructure is being formed. To regulate this process, a regulatory and legal framework has been developed: the Constitution of Ukraine, the Land Code of Ukraine, the Water Code of Ukraine, the Forest Code of Ukraine, the Laws of Ukraine «On Topographic, Geodetic and Cartographic Activities», «On the State Land Cadastre», «On Land Management», «On the Regulation of Urban Development», «On State Registration of Real Rights to Immovable Property and Their Encumbrances», «On Environmental Protection», «On the Natural Reserve Fund of Ukraine», «On Scientific and Scientific and Technical Expertise», «On Standardisation», «On Space Activities», «On Access to Public Information», «On Telecommunications», «On Geographical Names», «On the Basic Principles of Ensuring Cyber Security of Ukraine», «On Culture», «On the Protection of Cultural Heritage», «On Museums and Museum Affairs», other laws of Ukraine, international treaties, the binding nature of which has been approved by the Verkhovna Rada of Ukraine, as well as regulatory and legal acts governing relations with information and information systems. Of particular importance is the adoption of the Law of Ukraine «On the National Geospatial Data Infrastructure», which defines GIS as an information system designed to carry out activities with geospatial data and metadata [1]. The national geospatial data infrastructure is defined as a set of organisational structures, technical and software tools, basic and thematic geospatial data sets, metadata, services, technical regulations, standards, and technical specifications necessary for the production, updating, processing, storage, publication, use of geospatial data and metadata, and other activities with such data [1].

A theoretical and methodological platform for soil science has been developed to study soil conditions and provide geospatial mapping. The current state of soils is determined by the growing negative impact on them of mechanical, physical and military factors, which leads to a decline in the quality of land resources. Over the years of military operations, the level of soil pollution at the regional level has increased. It should be noted that the level of soil cultivation is high, especially in the Zaporizhzhia, Mykolaiv, Kirovohrad, Dnipropetrovsk, Odesa, and Kherson regions, where this indicator exceeds 80%. In such conditions, the urgent task is to form a quantitative monitoring basis for soil use at the regional level using geoinformation systems.

Review of existing theoretical developments. Existing scientific studies do not sufficiently substantiate the provisions regarding the formation of geoinformation support for soil conditions in the system of territorial

organisation. The organisational aspects of territorial development in the land use system are highlighted in studies [2–3]. The system of territorial organisation highlights the territorial aspects of land use in regions [4–7]. It has been determined that at the regional level, there is a need to transform the organisational structure by creating an institutional unit to regulate land relations, including the characterisation of soil condition and quality assessment. The structure of land resource management is characterised with the definition of organisational aspects of land use [8–10].

To ensure the condition and efficiency of land use, a system for planning their use and protection has been proposed [11–13]. The directions and features of land use have been determined, taking into account international and domestic experience [14–16].

The development of soil science as a science that determines the condition and quality of soils and their monitoring using cartographic support is considered in the works of S. V. Polyansky [17, 18].

The directions and features of the use of geoinformation systems in the system of land relations are defined in the scientific works of the authors [19–21].

At the same time, issues related to the development and application of geoinformation support for soil condition in the system of territorial organisation remain unresolved.

The aim of the study is to develop directions for the development and implementation of geoinformation support for soil conditions in the system of territorial organisation. The tasks for achieving this goal are:

– to identify factors that characterise soil conditions in the system of territorial organisation;
– to determine geoinformation support for soil condition in the system of territorial organisation;
– to characterise directions for the development and implementation of geoinformation support for soil condition in the system of territorial organisation.

Presentation of the main material. The condition and use of soils in the system of territorial organisation is influenced by a number of factors: spatial, functional, environmental, technological, organisational and investment. The study assesses the condition and use of soils according to specific factors and a developed scale (Table 1).

A theoretical and methodological platform has been developed to form a quantitative basis and develop geoinformation support for the condition and use of soils by region. Within this framework, geoinformation support for soil status in the territorial organisation system is defined as a system for tracking, monitoring and controlling land use at the regional level, implemented by the relevant organisational structure with the permanent use of modern geoinformation systems in terms of spatial, functional, environmental, technological, organisational and investment factors.

To determine the directions for the development and implementation of geoinformation support for soil condition in the system of territorial organisation, a quantitative basis has been established by assessing a general criterion:

$$\sigma_{GIS} = \beta_1 * \vartheta_1 + \beta_2 * \vartheta_2 + \beta_3 * \vartheta_3 + \beta_4 * \vartheta_4 + \beta_5 * \vartheta_5 + \beta_6 * \vartheta_6, \quad (1)$$

where σ_{GIS} – generalised criterion for geoinformation support of soil condition in the system of territorial organisation, ref. unit;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ – weight coefficients that characterise the mutual influence of spatial, functional, environmental, technological, organisational and investment factors and are assessed using the hierarchy analysis method, ref. unit;

$\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4, \vartheta_5, \vartheta_6$ – group spatial, functional, environmental, technological, organisational, and investment factors determined using expert and analytical methods, the geometric mean model, ref. unit.

The results of the assessment of the elements of the generalised criterion model for geoinformation support of soil condition in the territorial organisation system are presented in Table 2.

Table 1 *– Scale of soil condition and use by region, points (summarised by the authors)*
Таблиця 1 *– Шкала рівня стану та використання ґрунтів за регіонами, бали (узагальнено авторами)*

Points	Level characteristics
0	Lack of research on determining the condition and use of soils by region.
1	Low level of research, high soil contamination, intensive and inefficient land use, lack of a land use monitoring system, undefined capabilities and directions of geoinformation systems.
2	Low level of research, reduction in soil pollution, intensity and efficiency of land use, lack of a land use monitoring system, identified opportunities and directions for geoinformation systems.
3	Research is being conducted, soil pollution is being reduced, land use intensity and efficiency are being improved, elements of a land use monitoring system have been developed, and elements of geographic information systems are being applied.
4	Non-systematic research is being conducted, soil pollution levels are being reduced, land use intensity and efficiency are being improved, elements of a land use monitoring system have been developed and are being applied, and geoinformation systems are being used for individual factors.
5	Systematic research is being conducted, the average level of soil contamination and the intensity and efficiency of land use have been determined, elements of a land use monitoring system have been developed and are being applied, and geoinformation systems are being used to determine soil condition.
6	Systematic research is being conducted, a reduction in soil pollution and land use intensity has been identified, along with an insignificant increase in the efficiency of land use. A land use monitoring system has been developed and is being implemented, and geoinformation systems are being utilised.
7	Systematic research is being conducted, a reduction in soil pollution and land use intensity has been identified, and a significant increase in the efficiency of land use has been achieved. A land use monitoring system has been developed and is being implemented, and geoinformation systems are being used systematically.
8	Systematic research is being conducted, a systematic reduction in soil pollution and land use intensity has been identified, and high rates of growth in land use efficiency have been achieved. A land use monitoring system has been established, and geographic information systems are being used systematically. Geographic information support for soil condition and use at the regional level has been developed and is being applied in a non-systematic manner. A system for organising territories in the field of land use has been established.
9	Systemic research is being conducted, a systemic reduction in soil pollution has been identified, land use intensity and high rates of growth in land use efficiency have been identified, a land use monitoring system has been established and is functioning, and geoinformation systems are being systematically used to model spatial, functional, environmental, technological, organisational and investment factors. Geoinformation support for soil condition and use at the regional level has been developed and is being applied. A system for organising territories in the field of land use has been established and is functioning.
10	Permanent systematic research is being conducted, an absolute systematic reduction in soil pollution has been determined, the intensity of land use and the absolute rate of growth in the efficiency of its use have been determined, an effective land use monitoring system has been established and is functioning, and geoinformation systems are being systematically used to form and model spatial, functional, environmental, technological, organisational and investment factors. Geoinformation support for the condition and use of soils at the regional level has been systematically developed and is being applied. A system for the organisation of territories in the field of land use has been established and is functioning effectively.

The study found that organisational factors have the greatest impact on the level of geoinformation support for soil conditions in the system of territorial organisation by region. The highest values for this indicator were found in the Kyiv and Lviv regions. At the same time, the lowest values were found in the Donetsk and Luhansk regions. It should be noted that the values of functional, environmental and technological parameters decreased in all regions. The spatial and investment support for the formation of geoinformation support for soil condition in the system of territorial organisation by region was determined to be at a low level.

Table 2 *– Results of the assessment of the elements of the model of the generalised criterion for geoinformation support of soil condition in the system of territorial organisation by region (developed by the authors)*

Таблиця 2 *– Результати оцінки елементів моделі узагальнюючого критерію геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій за регіонами (розроблено авторами)*

Regions	$\beta_1 * \vartheta_1$	$\beta_2 * \vartheta_2$	$\beta_3 * \vartheta_3$	$\beta_4 * \vartheta_4$	$\beta_5 * \vartheta_5$	$\beta_6 * \vartheta_6$
Vinnytsia	0,825	0,332	0,223	0,187	1,203	0,803
Volyn	0,654	0,301	0,203	0,154	1,116	0,721
Dnipropetrovsk	0,889	0,337	0,215	0,185	1,785	0,801
Donetsk	0,112	0,025	0,056	0,021	0,125	0,030
Zhytomyr	0,785	0,303	0,211	0,176	1,201	0,801
Transcarpathian	0,699	0,305	0,201	0,101	1,195	0,821
Zaporizhzhia	0,145	0,265	0,197	0,089	1,017	0,204
Ivano-Frankivsk	0,855	0,308	0,204	0,176	1,201	0,801
Kyiv	0,911	0,327	0,209	0,197	1,908	0,897
Kirovograd	0,801	0,328	0,211	0,191	1,668	0,801
Luhansk	0,086	0,080	0,070	0,050	0,076	0,010
Lviv	0,828	0,325	0,227	0,196	1,901	0,899
Mykolaiv	0,823	0,311	0,118	0,176	1,119	0,453
Odessa	0,810	0,318	0,156	0,109	1,197	0,537
Poltava	0,803	0,315	0,198	0,158	1,201	0,673
Rivne	0,805	0,303	0,202	0,152	1,115	0,701
Sumy	0,801	0,278	0,102	0,136	1,009	0,090
Ternopil	0,805	0,302	0,203	0,175	1,200	0,800
Kharkiv	0,807	0,234	0,137	0,137	1,118	0,398
Kherson	0,732	0,204	0,101	0,098	0,992	0,153
Khmelnytskyi	0,807	0,301	0,202	0,145	1,200	0,708
Cherkasy	0,811	0,302	0,203	0,147	1,202	0,734
Chernivtsi	0,801	0,302	0,211	0,142	1,198	0,725
Chernihiv	0,799	0,287	0,201	0,132	1,201	0,669

Based on model 1 and the values presented in Table 2, an integral criterion for the level of formation of geoinformation support for soil conditions in the system of territorial organisation by region was determined (Fig. 1).

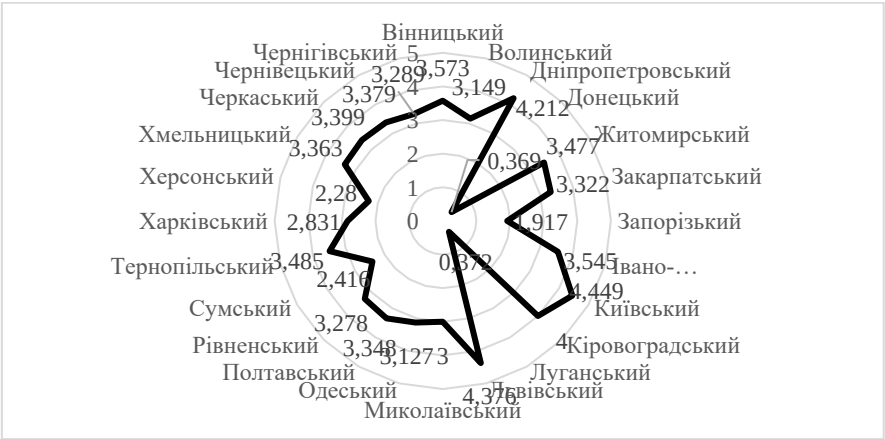


Figure 1 *– Integral criterion for the level of formation of geoinformation support for soil conditions in the system of territorial organisation by region, ref. unit (developed by the authors)*

Рисунок 1 *– Інтегральний критерій рівня формування геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій за регіонами, відн. од. (розроблено авторами)*

The assessment revealed an insignificant level of geoinformation support for soil condition in the system of territorial organisation by region. The lowest values of the general criterion were determined in the Donetsk and Luhansk regions, which is due to the impact of the Russian Federation's aggression. In addition, the value of the integral indicator indicates a low level of research, information provision, and the use of geoinformation systems to characterise soil conditions in the system of territorial organisation by region.

Based on the data obtained, geoinformation on soil conditions in the system of territorial organisation by region was compiled (Figs. 2–3).

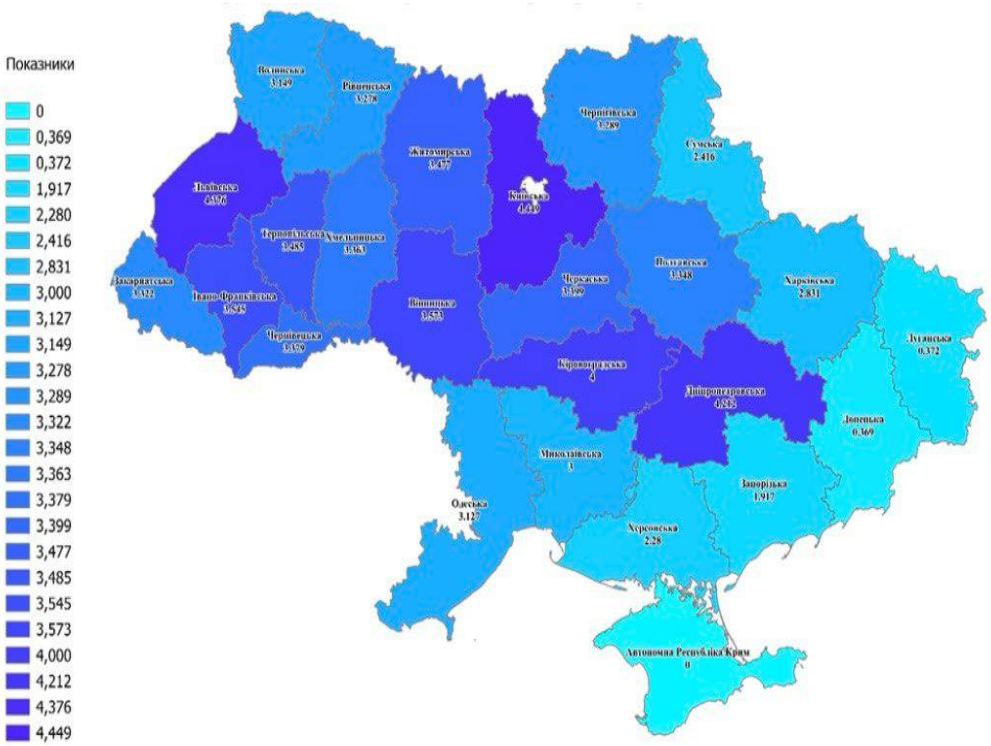
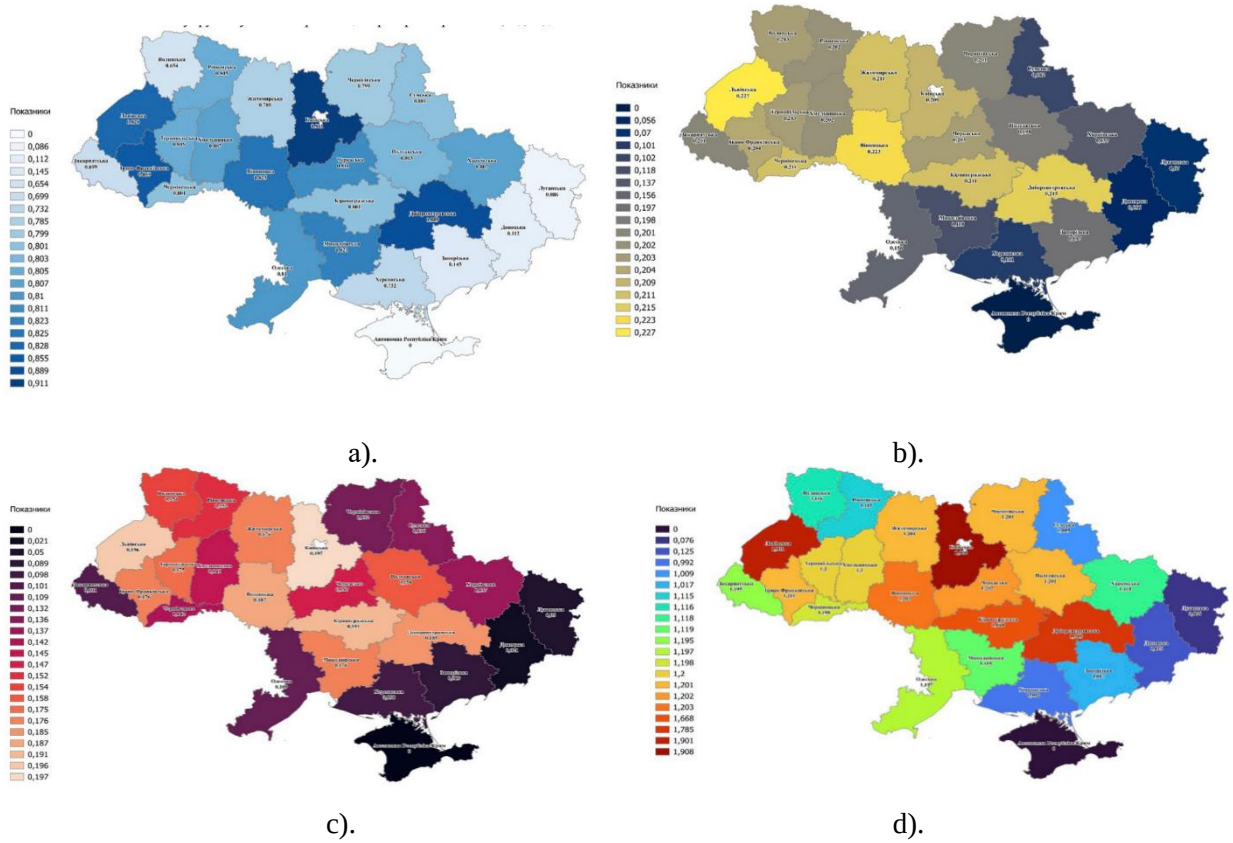


Figure 2 *– Integral criterion for the level of formation of geoinformation support for soil conditions in the system of territorial organisation by region, ref. unit.*

Рисунок 2 *– Інтегральний критерій рівня формування геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій за регіонами, відн. од.*

Conclusions. As a result of the study, geoinformation support for soil conditions in the system of territorial organisation by region was developed, which made it possible to form geospatial support for creating a quantitative basis and making informed decisions. In addition, geoinformation support provides opportunities to develop a monitoring system for determining the quality and use of soils in the system of territorial organisation.

Further research will focus on developing ways to build and implement geospatial monitoring technology for soil conditions by region based on the information and analytical support that has been developed and modern geoinformation systems.



a). b).

c). d).

Figure 3 (a-d) *– Results of the assessment of elements of the general criterion for geoinformation support of soil condition in the system of territorial organisation by region, ref. unit.*

Рисунок 3 (а-г) *– Результати оцінки елементів узагальнюючого критерію геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій за регіонами, відн. од.*

References

1. On the national geospatial data infrastructure. Law of Ukraine of 31.12.2023 554-IX. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text [in Ukrainian].

2. Stupen, M. (2003) Theoretical foundations of the organisation of land use and protection in populated areas in the context of land relations reform: doctoral thesis in economics. Kyiv, 463 p.

3. Khvesyk, M., Golyan, V. (2006) Institutional support for land use: theory and practice: monograph. Kyiv: NAU Publishing House, 260 p.

4. Mamonov, K., Meteshkin, K., Shternok, E., Viatkin, R. (2025) Organisational and spatial mechanism for ensuring territorial development of land use in regions. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. Issue 212. Pp. 133–141. https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_212_doi_3.pdf [in Ukrainian].

5. Mamonov, K., Chaika, T., Viatkin, R., Goi, V. (2025) Method for assessing the level of geospatial support for industrial land use in regions. Highways and Road Construction. Issue 118. Part 1. Pp. 134–141. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.1/134.pdf [in Ukrainian].

6. Mamonov, K., Bieliatynskyi, A., Gryanyk, V., Kanivets, O., Kovalenko, L. (2025) Geospatial modeling of directions for the development and implementation of the land administration system at the regional level. Civil and Environmental Engineering. Vol. 0. https://doi.org/10.2478/cee-2025-0072

7. Mamonov, K., Sklyar, I., Pilicheva, M., Kasyanov, V., Shyshkin, E. (2021) A model for assessing the regional land-use territorial development. Geodesy and cartography. Vol. 70(2). https://doi.org/10.24425/gac.2021.13668.

8. Dorosh, Y., Novakovsky, L., Tretyak, A. (2018) The state and problems of land management in amalgamated territorial communities in the context of improving their financial stability. Land Management Bulletin. № 12. Pp. 14–20.
9. Boklag, V. (2015) Formation and development of state policy in the field of land resource management in Ukraine: abstract of dissertation for the degree of Doctor of Science in Public Administration. Zaporizhia, 43 p.
10. Kuriltsov, R. (2013) Conceptual foundations for the development of a modern land resource management system in Ukraine. Land Management Bulletin. № 9. Pp. 25–28.
11. Chudovska, V. (2016) Development of a system for planning the rational use and protection of agricultural land. Balanced nature management. № 4. Pp. 177–182.
12. Dorosh, O. (2012) Theoretical and methodological foundations of territorial planning of land use: monograph. Kherson: Grin D.S., 434 p.
13. Randolph, J. (2002) Environmental Land Use Planning and Management. John Randolph. Washington: Island Press, DC, 664 p.
14. Hreschuk, H. (2018) Development of a system for planning the sustainable use and protection of agricultural land. Agrosvit. № 24. Pp. 23–30. http://www.agrosvit.info/pdf/24_2018/5.pdf [in Ukrainian].
15. Tretyak, A., Tretyak, V. (2020) Land zoning: legislative collapse and scientific principles of land use planning for amalgamated territorial communities. Agrosvit. № 23. Pp. 3–9.
16. Fernandes, E., Burcroff, R. (2006) Sustainable land management: challenges, opportunities, and tradoffs. Washington, DC: The World Bank, 112 p.
17. Polanskiy, S. (2016) Ecological problems of the soil cover of Volhynia. Current ecological status and prospects for environmentally safe sustainable development of the Volhynia region: collective monograph edited by V. O. Fesyuk. Kyiv: LLC «VI EN AY». Pp. 166–173.
18. Polanskiy, S., Polanska, T. (2021) The state of the soil cover of the Kopayevskaya drainage system (Volyn region). International scientific and practical conference «Ideas and innovations in natural sciences»: conference proceedings, Lublin. P. 160–164. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-006-3-37
19. Goi, V., Mamonov, K., Burvikov, I. (2024). Geoinformation systems in the process of regulatory monetary evaluation of land outside populated areas: prospects and challenges. Spatial Development. № (10). Pp. 427–440. https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.427-440
20. Bhunia, G., Shit, P., Sengupta, D. (2021) Free-open access geospatial data and tools for forest resources management. In: Spatial modeling in forest resources management: rural livelihood and sustainable development. Springer, Cham. Pp. 651–675. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56542-8_28
21. Makedon, V.V., Bailova, O. (2023) Planning and organisation of the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises. Scientific Bulletin of Kherson State University. Series «Economic Sciences». Issue 47. Pp. 16-26. https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3 [in Ukrainian].

ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАНУ ҐРУНТІВ У СИСТЕМІ ОРГАНІЗАЦІЇ ТЕРИТОРІЙ

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

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

Анотація. У статті доведена актуальність й досягнута мета щодо формування напрямів розробки й реалізації геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій. Вирішені завдання: виокремлення чинників, що характеризують стан ґрунтів у системі організації територій; визначення геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій; характеристика напрямів розробки й реалізації геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій.

Для вивчення стану ґрунтів, забезпечення геопросторового картографування, побудована теоретико-методологічна платформа ґрунтознавства. Сучасний стан ґрунтів визначається зростанням негативного впливу на них, механічних, фізичних, військових чинників, що призводить до зниження якості земельних ресурсів.

На стан та використання ґрунтів у системі організації територій впливає система чинників: просторові, функціональні, екологічні, технологічні, організаційні, інвестиційні. Здійснена оцінка чинників та інтегрального показника рівня формування геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій за регіонами. У результаті дослідження визначено, що найбільший вплив на рівень геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій за регіонами здійснюють організаційні чинники. Причому найбільшими значеннями цього показника характеризувались: Київський та Львівський регіони.

У результаті оцінки встановлено несуттєвий рівень формування геоінформаційного забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій за регіонами. Найнижчими значеннями узагальнюючого критерію визначались Донецький й Луганський регіони, що обумовлено впливом наслідків агресії рф. Крім того, значення інтегрального показника свідчить про низький рівень проведення досліджень, формування інформаційного забезпечення, застосування геоінформаційних систем для характеристики стану ґрунтів у системі організації територій за регіонами. Побудовано геоінформаційне забезпечення стану ґрунтів у системі організації територій за регіонами.

Ключові слова: ґрунтознавство, геоінформаційні системи, геоінформаційне забезпечення, інфраструктура геопросторових даних, типи ґрунтів, організація територій, оцінка чинників, моніторинг.

Перелік посилань

1. 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
2. Ступень М.Г. Теоретичні основи організації використання і охорони земель населених пунктів в умовах реформування земельних відносин: дис. … доктора екон. наук: 08.10.01. Київ, 2003. 463 с.
3. Хвесик М., Голян В. Інституціональне забезпечення землекористування: теорія і практика: монографія. К.: Книжкове вид-во НАУ, 2006. 260 с.
4. Мамонов К. А., Метешкін К. О., Штерндок Е. С., В'яткін Р. С. Організаційно-просторовий механізм забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2025. Випуск 212. С. 133–141. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_212_doi_3.pdf
5. Мамонов К. А., Чайка Т. М., Вяткін Р. С., Гой В. В. Метод оцінки рівня геопросторового забезпечення використання земель промисловості регіонів. Автомобільні дороги і дорожнє

будівництво. 2025. Вип. 118. Ч. 1. С. 134–141. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.1/134.pdf

6. Mamonov K., Bieliatynskyi A., Gryanyk V., Kanivets O., Kovalenko L. Geospatial modeling of directions for the development and implementation of the land administration system at the regional level. Civil and Environmental Engineering. 2025. Vol. 0. Issue 0. DOI: https://doi.org/10.2478/cee-2025-0072

7. Mamonov K., Sklyar I., Pilicheva M., Kasyanov V., Shyshkin E. A model for assessing the regional land-use territorial development. Geodesy and cartography. 2021. Vol. 70. № 2. DOI https://doi.org/10.24425/gac.2021.13668

8. Дорош Й., Новаковський Л., Третяк А. Стан та проблеми землеустрою об'єднаних територіальних громад у контексті підвищення їх фінансової стійкості. Землевпорядний вісник. 2018. № 12. С. 14–20.

9. Боклаг В.А. Формування та розвиток державної політики у сфері управління земельними ресурсами в Україні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. наук держ. упр. Запоріжжя, 2015. 43 с.

10. Курильцев Р.М. Концептуальні засади розвитку в Україні сучасної системи управління земельними ресурсами. Землевпорядний вісник. 2013. № 9. С. 25–28.

11. Чудовська В.А. Розвиток системи планування раціонального використання та охорони земель сільськогосподарського призначення. Збалансоване природокористування. 2016. № 4. С. 177–182.

12. Дорош О.С. Теоретико-методологічні засади територіального планування землекористування: монографія. Херсон: Грінь Д.С., 2012. 434 с.

13. Randolph J. Environmental Land Use Planning and Management. John Randolph. Washington: Island Press, DC, 2002. 664 p.

14. Грещук Г.І. Розвиток системи планування сталого використання та охорони сільськогосподарських земель. Агросвіт. 2018. № 24. С. 23–30. URL: http://www.agrosvit.info/pdf/24_2018/5.pdf

15. Третяк А.М., Третяк В.М. Зонування земель: законодавчий колапс та наукові засади планування розвитку землекористування об'єднаних територіальних громад. Агросвіт. № 23. 2020. С. 3–9.

16. Fernandes, E., Burcroff, R. et al. Sustainable land management: challenges, opportunities, and tradeoffs. Washington, DC: The World Bank, 2006. 112 p.

17. Полянський С.В. Екологічні проблеми ґрунтового покриву Волині. Сучасний екологічний стан та перспективи екологічно безпечного стійкого розвитку Волинської області: колективна монографія за ред. В. О. Фесюка. К.: ТОВ «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ», 2016. С. 166–173.

18. Полянський С. В., Полянська Т. О. Стан ґрунтового покриву Копаївської осушувальної системи (Волинської області). International scientific and practical conference «Ideas and innovations in natural sciences»: conference proceedings, March 12–13, 2021. Lublin: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2021. P.160–164. DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-006-3-37

19. Гой В., Мамонов К., Бурвіков І. Геоінформаційні системи в процесі нормативної грошової оцінки земель за межами населених пунктів: перспективи та виклики. Просторовий розвиток. 2024. №10. С. 427–440. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.427-440

20. Bhunia G.S., Shit P.K., Sengupta D. Free-open access geospatial data and tools for forest resources management. In: Spatial modeling in forest resources management: rural livelihood and sustainable development. Springer, Cham, 2021. pp. 651–675. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-56542-8_28

21. Македон В.В., Байлова О.О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки». 2023. Випуск 47. С. 16–26. DOI: https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3

UDC 004.8:528.94:910.2 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-148-158**
УДК 004.8:528.94:910.2

FORMATION OF THE CONCEPT OF CONDITIONAL NOOSPHERIC INTELLIGENCE USING ONTOLOGICAL AND GEOINFORMATION MODELING

ФОРМУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ УМОВНО-НООСФЕРНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ОНТОЛОГІЧНОГО ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ



Meteshkin Kostiantyn O., *Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Land Administration and Geoinformation Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine. tel. 0984091642*
e-mail: meteshkin@gmail.com,

https://orcid.org/0000-0002-1170-2062



Kukhar Maksym A., *PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor of Land Administration and Geoinformation Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine, tel. 0988351302 , e-mail: ppoosshhttaa@ukr.net,*

https://orcid.org/0000-0001-8305-6269



Masliy Liubov O., *PhD Student in the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine,*
e-mail: gnomomir@gmail.com,

https://orcid.org/0000-0003-3844-462X

Summary. Current scientific research demonstrates a tendency to use artificial intelligence for solving tasks in various fields of human activity. For example, tasks are addressed in geodesy for the automation of office processing of spatial data, in geographic information systems for the creation of vector models using machine learning, and in land management for the development of more automated systems of interaction with people.

However, certain interdisciplinary tasks, whose solutions require unconventional approaches, must be addressed at a higher level of information generalization. The highest level of generalization is essential for solving problems in legislative bodies, where laws are formulated that apply to all activities within the country.

The above considerations lead to the idea of creating a special intelligent system whose knowledge base would include a model of conditionally noospheric intelligence.

The term conditionally noospheric intelligence is introduced here because V. I. Vernadsky, in his doctrine of the noosphere, argued that all humanity on planet Earth influences its biosphere and that a collective mind, which he referred to as a «geological force» is necessary for the evolutionary transformation of the biosphere into the noosphere. Unfortunately, the impact of humanity on the Earth's biosphere is currently insufficiently studied. Nevertheless, the authors of this work attempt to develop an approach that would allow higher-quality interaction among specialists who are geographically distant and lack direct connections.

The purpose of this research is to provide a scientific rationale for the formation of the concept of conditionally noospheric intelligence using ontological and geographic information modeling to utilize the qualification potential of academic and teaching staff. Applying certain limitations and assumptions, the study examines the system's ability to systematically form groups of experts from among the intellectual elite, experts in their respective fields, to solve practical tasks and contemporary problems, with mathematical justification and representing scientific potential through a quantitative model constructed using geographic information technologies. Additionally, in this work, the intellectual elite refers to academic and teaching staff of higher educational institutions who have the appropriate specialization and a high qualification potential in their field of knowledge. Such a model may operate using artificial intelligence and information technologies but is not limited to them.

The study employs methods of system and functional analysis, as well as formal representations from set theory and utility theory, with the application of ontological and geographic information modeling.

As a result of the research, the term conditionally noospheric intelligence was introduced. For the first time, a conceptual representation of conditionally noospheric intelligence has been formulated. A core of conditionally noospheric intelligence has also been developed in the form of a mathematical model. Examples of potential applications of conditionally noospheric intelligence are presented using geographic information systems and illustrated within the field of geodesy.

Keywords: conditionally noospheric intelligence, artificial intelligence, analysis, ontological modeling, geographic information systems, geodesy and land management.

Introduction. The current stage of scientific and technological progress is characterized by intensified research in the field of artificial intelligence. Information technologies based on knowledge models are being developed. There is a clear trend toward the rapid growth of information; its volume and capacity are increasing dramatically, which, according to some scholars, may lead in the near future to an information singularity. In this context, Grid and Smart technologies – so-called «smart» technologies – are actively evolving, for example, smart watches, smart homes, smart cities, and so forth.

The authors of works [1–2] attempted to develop a concept for building a smart university. Higher education institutions are of particular interest to researchers because it is within them that the intellectual potential of the state is formed and concentrated. Works [3, 4] consider the idea of creating a cadastre of the state's intellectual resources, based on the already developed Land Cadastre – that is, the idea of establishing a Cadastre Information Processing Center (CIPC). One of the main functions of this center is to collect and standardize into a unified format various types of information received from different sources. In addition, this information must be classified and its properties identified: relevance, reliability, accuracy, and so on.

In this regard, the task of processing large volumes of data and developing corresponding decision-making solutions arises. It is important to note that it is proposed to solve specific tasks based on information that has different levels of generalization. For example, agricultural tasks of specific territorial communities may be solved with a high degree of detail and with reference to a specific geographic area. Environmental

tasks and problems must be addressed at a higher level of information generalization, as they cover large geographic regions and include data on enterprises that pollute the environment. Finally, the highest level of generalization is necessary for solving tasks within legislative bodies, where laws are formed whose effects extend across all activities within the country.

The above considerations suggest the possibility of creating a special intelligent system whose knowledge base would contain a model of conditionally noospheric intelligence.

The term «conditionally noospheric intelligence» is introduced here because V. I. Vernadsky, in his doctrine of the noosphere, argued that all humankind of planet Earth influences its biosphere, and that a collective mind («geological force» according to Vernadsky) is required for the evolutionary transformation of the biosphere into the noosphere. Unfortunately, it is currently impossible to account for the influence of all humankind on Earth's biosphere. Therefore, this work introduces certain constraints and assumptions: namely, conditionally noospheric intelligence (CNI) is understood as the system's ability to form expert groups composed of the intellectual elite – specialists in their respective fields – for solving practical contemporary tasks and problems.

Furthermore, the term intellectual elite refers to the academic and teaching staff of higher education institutions who possess the appropriate specialization and a high level of qualification in their domain of expertise.

Materials and Methods. The methodological basis of the study is a scientific approach to analyzing the research problems through the application of systematic and functional analysis, formal representations of set theory and utility theory, as well as ontological and geoinformation modeling.

The aim of the study is the scientific substantiation of the conceptual principles for creating quasi-noospheric intelligence using ontological and geoinformation modeling.

Main Results. We propose a conceptual model for the formation of conditionally noospheric intelligence, shown in Figure 1. Here, carriers of natural intelligence (NI) are academic and teaching staff (ATS), who, in the course of their professional activity, may progress from assistant (early-career lecturer) to professor, potentially assuming positions such as department head, dean, or rector. This process (T) is commonly referred to as career growth. A distinguishing feature of this process is that at different stages of professional activity $T=\{t_1^r, t_2^r, t_3^r, t_4^r\}$ an ATS member acquires the necessary knowledge and competencies and thereby develops and enhances their natural intelligence.

urthermore, in studying human intellectual activity, Howard Gardner [5] identified and substantiated nine components of natural intelligence, which he termed the components of multiple intelligence.

To strengthen the semantic content of Gardner's components, instead of the term «component», we will use the term vector, which indicates the directionality of a person's intellectual activity.

Thus, we denote $\overrightarrow{\rho_1}, \overrightarrow{\rho_2}, \overrightarrow{\rho_3}, \ldots, \overrightarrow{\rho_8}, \overrightarrow{\rho_9},$ де ρ_1 – naturalistic vector; $\overrightarrow{\rho_2}$ – musical vector; $\overrightarrow{\rho_3}$ – logical-mathematical vector; $\overrightarrow{\rho_4}$ – linguistic-verbal vector; $\overrightarrow{\rho_5}$ – existential vector; $\overrightarrow{\rho_6}$ – interpersonal vector, $\overrightarrow{\rho_7}$ – intrapersonal vector; $\overrightarrow{\rho_8}$ – bodily-kinesthetic vector; $\overrightarrow{\rho_9}$ – visual-spatial vector. Formally, we identify natural intelligence (NI) with multiple intelligence $\Upsilon=\{\overrightarrow{\rho_i}\}, i=\overline{1,9}$.

Such a decomposition and classification of the natural intelligence of ATS allow a formal description of the properties characteristic of a particular carrier of natural intelligence, as well as revealing the directionality of intellectual activity within a specific specialty.

There exist various approaches to evaluating intellectual activity, particularly those oriented toward assessing the results of intellectual activity. This refers to quantitative indicators such as the Hirsch citation

index (h-index). Unfortunately, existing methods and tests have a number of limitations that do not allow for quantitative assessment of collective intelligence.

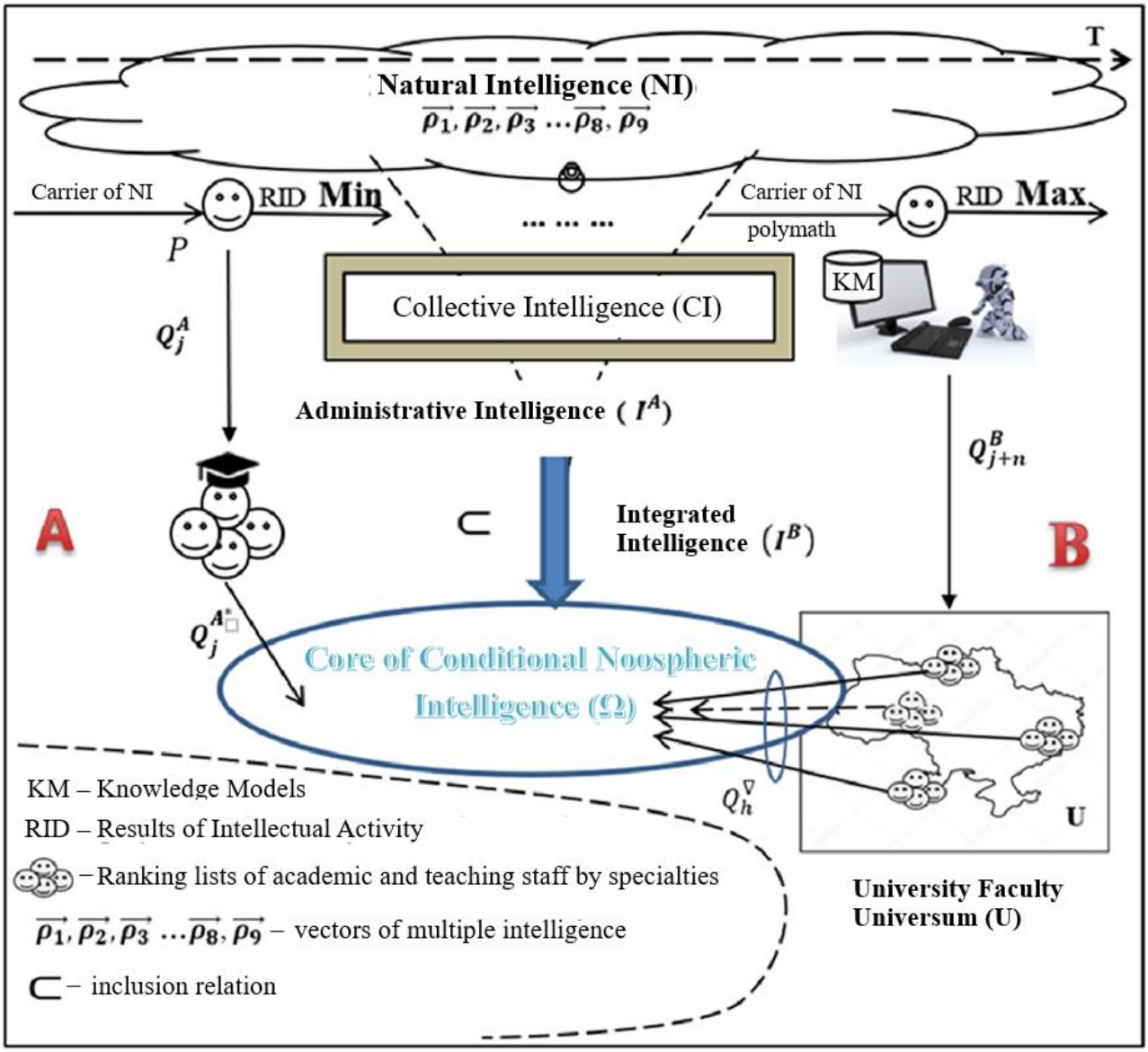


Figure 1 – Conceptual Model of the Formation of Quasi-Noospheric Intelligence
Рисунок 1 – Концептуальна модель формування умовно-ноосферного інтелекту

The model presented in Figure 1 consists of two branches, ***A*** and ***B***. Branch ***A*** represents collective intellectual activity within organizational structures of different systems. We call this type of activity administrative intelligence and denote it as (I^A). Here, private tasks in various subject domains are solved collectively using computational tools – for example, at a department meeting in an educational institution, a technical meeting at an enterprise, or a medical council determining a treatment strategy for a patient.

Branch ***B*** reflects the essence of group intellectual activity focused on working with knowledge models (***KM***), that is, with artificial intelligence. Such collective intelligence is referred to as integrated or hybrid intelligence and is denoted I^B.

We highlight an important component in the formation of the core of conditionally noospheric intelligence, denoted (**Ω**). This collective intelligence is not formed by all ATS in Ukrainian higher education institutions, but only by those who rank highest within their respective specialties. To explain this, let us characterize the relationships and connections that may arise during the formation of CNI. o achieve this, we reformat Figure 1 and abstract from minor details. In Figure 2, we highlight the time axis ***T***, which reflects temporal relations in the process of forming CNI. These relations include learning, knowledge accumulation, and competence formation in ATS, characterized by their qualification potential.

Let us denote Q_j^A – the relation «to be useful for solving specific (local) tasks» within a given collective (e.g., performing program guarantor functions within a department); $Q_j^{A^*}$ – a set of relations forming morphism cones within **Ω** for solving complex tasks in various subject domains; Q_{j+n}^B – «to be useful for solving weakly structured, multicriteria complex tasks» within a group of experts forming integrated intelligence; $Q_h^{B\nabla}$ – a set of relations forming morphism cones within **Ω** for solving complex tasks in various subject domains.

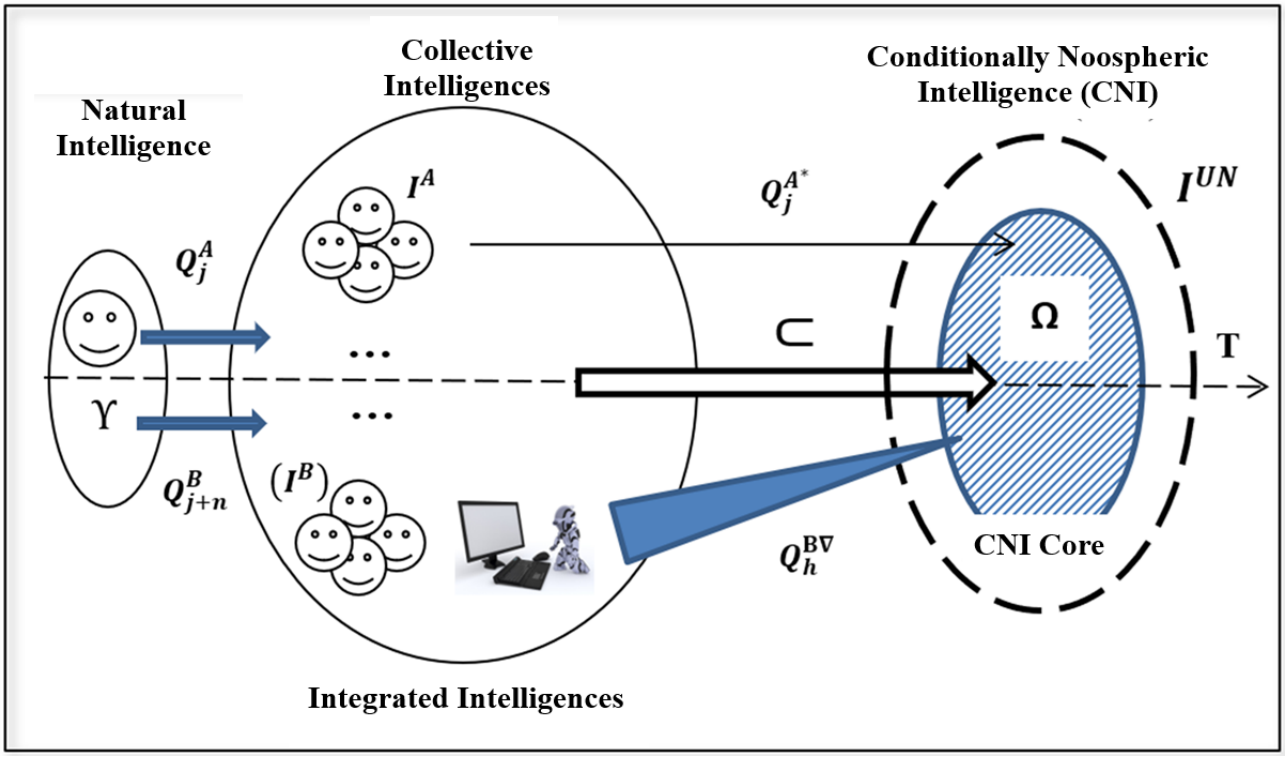


Figure 2 – Illustration of the Relationships Between the Elements of Conditionally Noospheric Intelligence
Рисунок 2 – Ілюстрація відносин між елементами умовно-ноосферного інтелекту

Abstracting from specific details of forming the CNI core, we express it analytically as:

$$M(I^{UN}) = (P(\Upsilon), I^A, I^B \overbrace{Q_j^{A^*}, Q_h^{B\nabla}}^{signature}, \subset, T).$$

Graphical and analytical interpretation of the CNI formation process allows us to conclude that the CNI core is formed for a specific task or problem. This implies that the foundation of the entire process is the qualification potential of carriers of natural intelligence, represented by the diversity of multiple intelligence $\Upsilon=\{\vec{\rho_i}\}$.

CNI represents a conceptual model of an intellectual environment encompassing human, social, cultural, natural, and technotronic components, based on the experience of leading specialists in specific domains of knowledge. If developed as a real model of interaction and application of knowledge, it possesses a higher level of generalization than traditional artificial intelligence, whose features have been considered in [6–8]. Such a model may function using AI and information technologies but is not reducible to them..

In examining the peculiarities of knowledge-based models in geographic information systems and related fields [9–13], the idea emerged to reflect the scientific potential of Ukraine, which can become the foundation for implementing CNI. This mathematical model establishes the basic principle for determining quantitative effectiveness of ATS, enabling more detailed ranking models for selecting researchers to address specific tasks within academic disciplines and university research domains. For example, Figure 3 presents a quantitative model of higher education institutions (HEIs) in Ukraine by region, based on GIS data derived from [14–15]..



Figure 3 – Model of the number of Higher Education Institutions (HEIs) by regions of Ukraine
Рисунок 3 – Модель кількості ЗВО по областям України

Using this model, which characterizes only the quantitative scientific development of Ukrainian regions, it becomes possible to enrich it qualitatively by calculating parameters of individual CNI components and linking them to HEI-related data.

These data are current and closely aligned with reality based on the conducted experiment and open sources of the Ministry of Education and Science of Ukraine. They demonstrate changes in HEI scientific performance depending on ATS composition. However, fuller and more reliable modeling requires a larger dataset, using not an averaged experimental indicator but relevant data for individual ATS.

Conditionally noospheric intelligence is a tool for integrating knowledge and professional experience across fields, forming an aggregated intellectual field. This field enables well-founded recommendations for solving complex cross-disciplinary tasks. The system takes into account factors that individual ATS members may overlook, especially in cases beyond classical solutions.

For example, in geodesy and land management, CNI can provide a much broader context for evaluating data – from legal aspects of land administration to ecological, social, and technical interdependencies that influence spatial measurements, their interpretation, and the use of non-standard geodetic technologies. This enables specialists to obtain not only results but interdisciplinary recommendations derived from the collective experience of experts from multiple scientific fields.

Overall, the development and implementation of CNI will ensure a qualitatively new level of decision-making across various domains of human activity.

Conclusions. This study formulates conceptual principles for the formation of conditionally noospheric intelligence as the next stage in the evolution of humanity's information space.

For the first time, the term «conditionally noospheric intelligence» has been introduced, based on the works of V. I. Vernadsky.

For the first time, conceptual principles for the formation of CNI using ontological and geoinformation modeling have been developed, relying on the knowledge and experience of ATS.

For the first time, ontological models of the functioning of conditionally noospheric intelligence have been constructed.

Examples of information support for CNI and its potential applications in geodesy and land management have been presented.

Overall, the results of this study constitute a development that, in contrast to existing research in artificial intelligence, proposes a concept that anticipates modern technological understanding, while AI methods and tools can facilitate the implementation of the complex structures of CNI..

Acknowledgments. The authors express their gratitude for support in preparing the manuscript. A large language model, ChatGPT (https://chatgpt.com/), was used as an auxiliary tool for formatting the translation of the text from Ukrainian into English.

References

1. Meteshkin, K. O., & Kukhar, M. A. (2022). Stvorennia uzahalnenoi modeli navchalno-metodychnoho zabezpechennia v systemi «Rozumnyi zaklad vyshchoi osvity» na prykladi spetsialnosti 193 «Heodeziia ta zemleustrii» [Creation of generalized model of educational and methodological support in the system «Smart institution of higher education» on the example of specialty 193 «Geodesy and land management»]. *Komunalne hospodarstvo mist, 3*(170), 234–238. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-234-238 [in Ukrainian].
2. Meteshkin, K. O., & Kukhar, M. A. (2022). Formalizatsiia protsesiv i yavyshch v systemi «Rozumnyi zaklad vyshchoi osvity» na prykladi spetsialnosti 193 «Heodeziia ta zemleustrii» [Formalization of processes and phenomena in the system «Smart institution of higher education» on the example of specialty 193

«Geodesy and land management»]. *Komunalne hospodarstvo mist, 3*(170), 239–246. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-239-246 [in Ukrainian].

3. Maslii, L. O., Meteshkin, K. O., & Kukhar, M. A. (2024). Modeliuvannia struktury tsentru obrobky kadastrovoi informatsii [Modeling the structure of the cadastral information processing center]. Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo. Sektsiia «Heodeziia ta zemleustrii», 116(1), 116–123. DOI: https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-116.1-116-123 [in Ukrainian].

4. Maslii, L. O., Meteshkin, K. O., & Kukhar, M. A. (2024). Katehorna model tsentru obrobky kadastrovoi informatsii [Categorical model of the cadastral information processing center]. Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo. Sektsiia «Heodeziia ta zemleustrii», 116(2), 104–114. DOI: https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-116.2-104-114 [in Ukrainian].

5. Gardner H. Multiple Intelligences: The Theory in Practice. New York : Basic Books, 1993. p.330. URL: https://archive.org/details/multipleintellig0000gard [in English].

6. Zhang, K., & Aslan, A. B. (2021). AI technologies for education: Recent research & future directions. *Computers and Education: Artificial Intelligence, 2*, 1–12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100025

7. Lin, C.-C., Huang, A. Y. Q., & Lu, O. H. T. (2023). Artificial intelligence in intelligent tutoring systems toward sustainable education: A systematic review. *Smart Learning Environments, 10*(41), 1–22. DOI: https://doi.org/10.1186/s40561-023-00260-y [in English].

8. Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – Where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education, 16*(39), 1–27. DOI: https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0 [in English].

9. Mamonov, K., Kukhar, M., Shterndok, E., & Kamchatna, S. (2023). Standardization of geodetic data for determination of boundaries of natural reserve areas. *E3S Web of Conferences, 452*, 1–13. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345203001 [in English].

10. Valeeva, R., Biktagirova, G., Lesev, V., Mikhailenko, O., Skudareva, G., & Valentovinis, A. (2023). Exploring the impact of modeling in science education: A systematic review. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, *19*(6), 1–22. DOI: https://doi.org/10.29333/ejmste/13268

11. Zhang, W., & Mei, H. (2020). A constructive model for collective intelligence. *National Science Review*, *7*(8), 1273–1277. DOI: https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa092

12. Vinueza-Martinez, J., Correa-Peralta, M., Ramirez-Anormaliza, R., Franco Arias, O., & Vera Paredes, D. (2024). Geographic information systems (GISs) based on WebGIS architecture: Bibliometric analysis of the current status and research trends. *Sustainability, 16*(15), 1–37. DOI: https://doi.org/10.3390/su16156439 [in English].

13. Kukhar, M. A., & Horoshanskyi, T. S. (2025). Suchasnyi pidkhid do vyrishennia zadach zboru ta analizu prostorovoi informatsii [Modern approach to solving problems of spatial information collection and analysis]. *Komunalne hospodarstvo mist, 3*(191), 401–407. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-401-407 [in Ukrainian].

14. Register of educational activity entities: Higher education institutions. (n.d.). Yedyna derzhavna elektron-na baza z pytan osvity [Unified State Electronic Database on Education]. URL: https://registry.edbo.gov.ua/?utm_source [in Ukrainian].

15. Report on the quality of higher education in Ukraine, its compliance with the tasks of sustainable innovative development of society in 2023. (2023). Natsionalne ahentstvo iz zabezpechennia yakosti vyshchoi

osvity [National Agency for Higher Education Quality Assurance]. URL: https://naqa.gov.ua/wp-content/uploads/2024/05/Доповідь-2023-року.pdf?utm_source [in Ukrainian].

ФОРМУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ УМОВНО-НООСФЕРНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ОНТОЛОГІЧНОГО ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Метешкін Костянтин Олександрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: meteshkin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8305-6269

Кухар Максим Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: ppoosshhttaa@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-8305-6269

Маслій Любов Олексіївна, аспірант кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: gnomomir@gmail.com , https://orcid.org/0000-0003-3844-462X

Анотація. В існуючих наукових дослідженнях спостерігається тенденція використання штучного інтелекту для вирішення задач в різних галузях діяльності людини. Так, наприклад, вирішуються задачі й в сфері геодезії для автоматизації камеральної обробки просторових даних, в геоінформаційних системах для формування векторних моделей за допомогою машинного навчання, в землеустрої для формування більш автоматизованих систем взаємодії з людьми.

Але певні міждисциплінарні задачі, вирішення яких потребує нестандартних підходів мають вирішуватися на більш високому рівні узагальнення інформації. Найвищий рівень узагальнення є необхідним для вирішення задач у законодавчих органах влади, де формуються закони, дія яких поширюються на всю діяльність всередині країни.

Вищесказане призводить до думки про можливість створення спеціальної інтелектуальної системи, база знань якої містила б модель умовно-ноосферного інтелекту.

Термін «умовно-ноосферний інтелект» тут запроваджено тому, що В. І. Вернадський у своєму вченні про ноосферу стверджував, що все людство планети Земля впливає на її біосферу і необхідний колективний розум («геологічна сила» за Вернадським) для еволюційного перетворення біосфери на ноосферу. На жаль, врахувати вплив людства на біосферу Землі нині недостатньо вивчено, але автори даної роботи намагаються сформувати певний підхід, який дозволить більш якісну взаємодію спеціалістів на великій відстані між ними та при відсутності між ними прямих зв'язків.

Метою цього дослідження є наукове обґрунтування формування концепції умовно-ноосферного інтелекту з застосуванням онтологічного та геоінформаційного моделювання для використання кваліфікаційного потенціалу науково-педагогічних працівників. застосовуючи обмеження та припущення, а саме розглянути його здатність системно формувати групи експертів із числа інтелектуальної еліти, експертів у своїх галузях, для вирішення практичних завдань та проблем сучасності, з застосуванням математичного обґрунтування та відображуючи науковий потенціал кількісною моделлю сформованою за допомогою геоінформаційних технологій. Крім того, в цій роботі під інтелектуальною елітою розуміються науково-педагогічні працівники вищих навчальних закладів,

які мають відповідну спеціальність і високий кваліфікаційний потенціал у своїй галузі знань. Подібна модель може функціонувати, використовуючи засоби штучного інтелекту та інформаційних технологій, але не зводиться до них.

В роботі використовували методи системного, функціонального аналізу, а також формальні уявлення теорії множин і теорії корисності з застосуванням онтологічного та геоінформаційного моделювання.

В результаті дослідження виведено термін «умовно ноосферний-інтелект». Вперше сформовано концептуальне представлення умовно ноосферного-інтелекту. Також, розроблено ядро умовно-ноосферного інтелекту у вигляді математичної моделі. Представлені приклади можливого застосування Умовно-ноосферного інтелекту за допомогою ГІС та на прикладі геодезії.

Ключові слова: умовно-ноосферний інтелект, штучний інтелект, аналіз, онтологічне моделювання, геоінформаційні системи, геодезія та землеустрій.

Перелік посилань

1. Метешкін К.О., Кухар М.А. (2022) Створення узагальненої моделі навчально-методичного забезпечення в системі «Розумний заклад вищої освіти» на прикладі спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій». *Комунальне господарство міст*. 3(170), 234–238. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-234-238
2. Метешкін К.О., Кухар М.А. (2022) Формалізація процесів і явищ в системі «розумний заклад вищої освіти» на прикладі спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій». *Комунальне господарство міст*. 3(170), 239-246. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-239-246
3. Маслій Л.О., Метешкін К.О., Кухар М.А. Моделювання структури центру обробки кадастрової інформації / Л.О.Маслій, К.О.Метешкін, М.А.Кухар // Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». Секція «Геодезія та землеустрій», 2024. Випуск 116. Частина 1. С. 116-123. DOI: https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-116.1-116-123
4. Маслій Л.О., Метешкін К.О., Кухар М.А. Категорна модель центру обробки кадастрової інформації / Маслій Л.О., Метешкін К.О., Кухар М.А. // Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». Секція «Геодезія та землеустрій», 2024. Випуск 116. Частина 2. С. 104-114.: https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-116.2-104-114
5. Gardner H. Multiple Intelligences: The Theory in Practice. New York : Basic Books, 1993. p.330. URL: https://archive.org/details/multipleintellig0000gard (дата звернення: 29.11.2025).
6. Zhang K., Aslan A. B. (2021) AI technologies for education: Recent research & future directions. *Computers and Education: Artificial Intelligence.* 2, 1-12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100025
7. Lin C.-C., Huang A. Y. Q., Lu O. H. T. (2023) Artificial intelligence in intelligent tutoring systems toward sustainable education: a systematic review. *Smart Learning Environments*. 10(41), 1–22. DOI: https://doi.org/10.1186/s40561-023-00260-y
8. Zawacki-Richter O., Marín V. I., Bond M., Gouverneur F. (2019) Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators?. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 16(39), 1–27. DOI: https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0
9. Mamonov K., Kukhar M., Shterndok E., Kamchatna S. (2023) Standardization of geodetic data for determination of boundaries of natural reserve areas. *E3S Web of Conferences.* 452, 1-13. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345203001

10. Valeeva R., Biktagirova G., Lesev V., Mikhailenko O., Skudareva G., Valentovinis A. (2023) Exploring the impact of modeling in science education: A systematic review. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. 19(6), 1–22. DOI: https://doi.org/10.29333/ejmste/13268

11. Zhang W., Mei H. (2020) A constructive model for collective intelligence. *National Science Review*. 7(8), 1273-1277. DOI: https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa092

12. Vinueza-Martinez J., Correa-Peralta M., Ramirez-Anormaliza R., Franco Arias O., Vera Paredes D. (2024) Geographic Information Systems (GISs) Based on WebGIS Architecture: Bibliometric Analysis of the Current Status and Research Trends. *Sustainability*. 16(15), 1–37 DOI: https://doi.org/10.3390/su16156439

13. Кухар М.А., Горошанський Т.С. (2025) Сучасний підхід до вирішення задач збору та аналізу просторової інформації *Комунальне господарство міст.* 3(191), 401-407. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-401-407

14. Реєстр суб'єктів освітньої діяльності: заклади вищої освіти. Єдина державна електронна база з питань освіти. URL: https://registry.edbo.gov.ua/?utm_source

15. Доповідь про якість вищої освіти в Україні, її відповідність завданням сталого інноваційного розвитку суспільства у 2023 році. Національне агентство із забезпечення якості вищої освіти. URL: https://naqa.gov.ua/wp-content/uploads/2024/05/Доповідь-2023-року.pdf?utm_source

UDC 528:332.3 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-159-165**
УДК 528:332.3

GEO-ECOLOGICAL MONITORING IN THE REGIONAL LAND USE SYSTEM

ГЕОЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ У СИСТЕМІ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ



Nesterenko Svitlana V., *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of highways, geodesy, land management and rural buildings National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Ukraine, e-mail: NesterenkoS2208@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-2288-3524



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, Ukraine, e-mail: shterndok@ukr.net*

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, Ukraine, e-mail: viatkinr@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0001-8807-9988

Abstract. The relevance of the research topic and the feasibility of its development have been determined. The goal set in the article has been achieved and the tasks have been solved regarding: substantiation of theoretical and methodological approaches to determining geo-ecological monitoring of land use in regions; identification of structural components of geo-ecological monitoring; assessment of the level of development and application of geo-ecological monitoring of land use in regions.

The structural elements of geo-ecological monitoring of land use in regions have been identified: formation and application of information support; creation of spatial support; formation of a quantitative basis for assessing the factors of formation and application of geo-ecological monitoring of land use in regions; identification and assessment of the factors of formation and application of geo-ecological monitoring; application of mathematical tools; use of geoinformation systems for geoecological monitoring of land use in regions; making informed decisions.

As a result of the study, it is proposed to define geo-ecological monitoring of land use in regions as a system consisting of a set of spatial, informational, instrumental, and evaluative structural elements, the interaction of which is carried out using mathematical modelling and geographic information systems, which allows the formation of a monitoring environment for decision-making.

It has been established that in most regions, the level of formation and application of geo-ecological monitoring of land use is moderate. However, the formation and application of geo-ecological monitoring in the Donetsk, Zaporizhzhia, Luhansk, Sumy and Kherson regions is at a low level. The results indicate the need to take action to increase the efficiency of land use in the regions and introduce monitoring technologies, change environmental policy and ensure safety procedures, using the capabilities of modern geoinformation systems.

Key words: geoecological monitoring, land use, mathematical modelling, assessment, regional level.

Introduction. Changes in the formation and implementation of land relations, which are determined by internal and external regional imbalances, the growing influence of a wide range of factors, the consequences of hostilities and the occupation of territories, necessitate the use of modern monitoring tools.

It should be noted that the indirect losses from aggressive actions amount to more than $1 trillion. Moreover, significant losses are related to environmental safety and land relations. There is a violation of environmental conditions, a deepening of environmental problems, and a decrease in the efficiency of land use.

Legislative support has been established for the formation and application of geo-ecological monitoring in the system of land use in the regions: the Constitution of Ukraine, the Land Code, the Laws of Ukraine «On Land Management», «On Land Protection», «On Environmental Protection», «On Air Protection», «On Waste», «On Environmental Expertise», «On the State Land Cadastre», «On Land Valuation», «On State Registration of Real Rights to Immovable Property and Their Encumbrances», «On the Protection of Information in Information and Communication Systems», «On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding the State System of Environmental Monitoring, information on the state of the environment (ecological information) and information support for management in the field of the environment», Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On Public Monitoring of Land Relations».

In addition, the formation of regulatory and legal support for the use of geographic information systems for monitoring procedures is of particular importance: Law of Ukraine «On National Geospatial Data Infrastructure», Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine «Procedure for the Functioning of the National Geospatial Data Infrastructure».

At the same time, there is no law defining the directions and features of the development and application of geo-ecological monitoring of land use at the regional level.

In addition, the theoretical and methodological provisions for defining geo-ecological monitoring of land use in regions, its structure and elements need to be clarified.

It should be noted that there is no unified system of geo-ecological monitoring of land use at the regional level. Therefore, the research topic is relevant and influences the formation of the basis for the development of environmental and land relations..

Review of existing theoretical developments. Scientists are engaged in resolving issues related to the formation and application of environmental monitoring, as well as the specifics of using the relevant tools [1–3].

The quantitative basis for geo-ecological monitoring is formed through mathematical modelling, the directions and features of which are presented in [4–8].

The development of geo-ecological monitoring of land use and the modelling of complex processes occurring at the regional level are carried out using a modern geographic information system. In this context, the developments of the authors [9–11] deserve attention.

Problematic issues of defining, forming and applying geo-ecological monitoring of land use are addressed in works [12–14].

At the same time, issues related to the identification of factors and the development of technology for geo-ecological monitoring of land use at the regional level remain unresolved. Assessment processes and the categorical apparatus for determining geo-ecological monitoring need to be improved, taking into account the specifics of land use.

The aim of the study is to improving the concept of geo-ecological monitoring of land use in regions and justifying the directions of its development and application. The article addresses the following tasks:

– justification of theoretical and methodological approaches to determining geo-ecological monitoring of land use in regions;

– identification of structural components of geo-ecological monitoring;

– assessment of the level of development and application of geo-ecological monitoring of land use in regions.

Presentation of the main material. Taking into account regulatory, legal, theoretical and methodological support, the following approaches to determining geo-ecological monitoring of land use in regions are justified:

– ***functional:*** characterised by directions and determined by the specifics of geo-ecological monitoring use;

– ***structural:*** the structural components of geo-ecological monitoring of land use in regions are identified;

– ***factorial:*** the elements for determining geo-ecological monitoring are characterised;

– ***comprehensive:*** monitoring is justified as a system of interacting elements that allows the formation of a basis for decision-making.

The structural elements of geo-ecological monitoring of land use in regions include:

– formation and application of information support;

– creation of spatial support;

– formation of a quantitative basis for assessing the factors of formation and application of geo-ecological monitoring of land use in regions;

– identification and assessment of the factors of formation and application of geo-ecological monitoring;

– application of mathematical tools;

– use of geographic information systems for geo-ecological monitoring of land use in regions;

– making informed decisions.

As a result of the assessment, an indicator of the level of formation and application of geo-ecological monitoring of land use in regions was determined (Fig. 1).

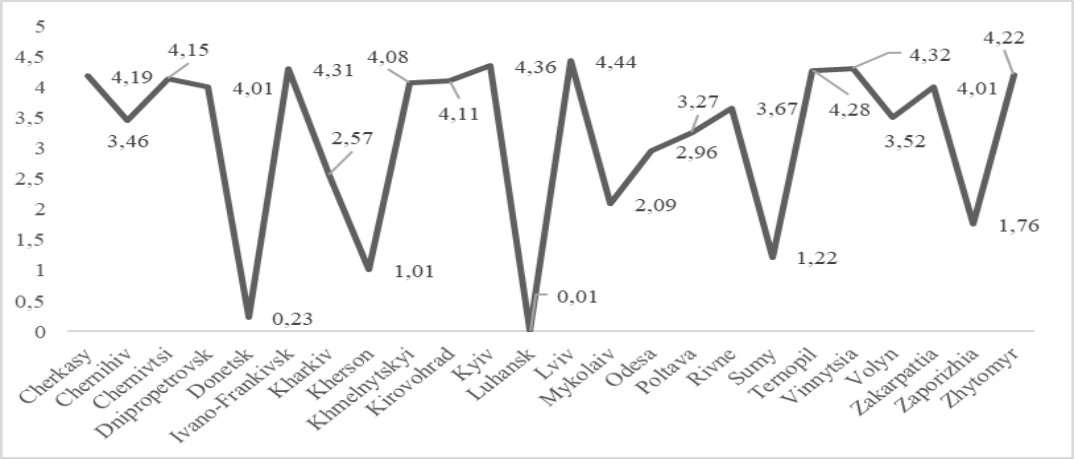


Figure 1 *– Results of assessing the level of development and application of geo-ecological monitoring of land use in regions, relative units.*

Рисунок 1 *– Результати оцінки показника рівня формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель регіонів, відн. од.*

To characterise the assessment results, a scale was constructed to measure the level of development and application of geologic monitoring of land use in the regions (Table 1).

Table 1 – Scale of compliance with the level of development and application of geologic monitoring of land use in regions, relative units.

Таблиця 1 – Шкала відповідності рівня формування й застосування геокологічного моніторингу використання земель регіонів, відн. од.

Range of values for the indicator	Characteristics of the level of development and application of geo-ecological monitoring
0	not available
0,01 – 2,0	low
2,01 – 4,0	insignificant
4,01 – 6,0	mediocre
6,01 – 8,0	significant
8,01 – 9,99	high
10 or more	absolute

Conclusion. Thus, the study proposes defining geo-ecological monitoring of land use in regions as a system consisting of a set of spatial, informational, instrumental, and evaluative structural elements, the interaction of which is carried out using mathematical modelling and geoinformation systems, allowing the formation of a monitoring environment for decision-making.

It has been established that in most regions, the level of formation and application of geo-ecological monitoring of land use is moderate. However, the formation and application of geo-ecological monitoring in the Donetsk, Zaporizhzhia, Luhansk, Sumy, and Kherson regions is at a low level. The results indicate the need to take action to increase the efficiency of land use in the regions and introduce monitoring technologies, change environmental policy and ensure safety procedures, using the capabilities of modern geoinformation systems.

References

17. Lindenmayer, D.B., Likens, G.E. (2009) Adaptive monitoring – a new paradigm for long-term studies and monitoring. Trends in Ecology & Evolution. № 24(9). Pp. 482–486. https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.005

18. Rouse, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., Harlan, J.C. (1974) Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation; Texas A&M University Remote Sensing Center: College Station, TX, USA, 390 p. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19750020419/downloads/19750020419.pdf

19. Sun, X., Wang, L., Li, Y., Yang, Q., Wu, Z., Gao, F., Lu, L., Xiao, F., Ling, F. (2023) Remote Sensing Assessment of the Water Conservation Function of Ecological System in Dabieshan Mountain Area of Hubei Province. Resources and environment in the yangtze basin. Vol. 32. Issue 3. Pp. 487–497. https://yangtzebasin.whlib.ac.cn/EN/abstract/abstract13482.shtml

20. Mamonov, K., Viatkin, R., Chaika, T. (2025) Mathematical modelling of factors influencing industrial land use in regions. Scientific Bulletin of Construction. Issue № 112. pp. 362–368. https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1898/1819 [in Ukrainian].

21. Mamonov, K., Shterndok, E., Goi, V., Radzinska, Yu. (2025) Mathematical modelling of factors affecting the efficiency of land use in regions. Automobile roads and road construction. Issue 117. Part 1. pp. 157–165. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.1/157.pdf

22. Mamonov, K., Goi, V., Viatkin, R., Mamonov, V. (2025) Characteristics of mathematical methods and models for real estate market analysis. Municipal Economy of Cities. Series: Engineering Sciences and Architecture. Volume 1. Issue 189. P. 291–295. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6479/6399 [in Ukrainian].

23. Mamonov, K., Meteshkin, K., Goi, V., Viatkin, R. (2024) Mathematical modelling of factors influencing the functioning of complex systems of territorial development and land use in regions. Municipal

Economy of Cities. Series: Engineering Sciences and Architecture. Volume 6. Issue 187. P. 180–184. https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6404/632 [in Ukrainian].

24. Mamonov, K., Pilicheva, M., Frolov, V., Viatkin, R., Voitenko, O. (2024) Mathematical modelling of geospatial development indicators for territorial communities. Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology. Volume 9. № 3. pp. 287–292. https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-3-50 [in Ukrainian].

25. Mamonov, K., Radzinska, Y., Frolov, V., Yevdokimov, A., Shterndok, E. (2025) Application of geoinformation systems and technologies in urban planning monitoring of territorial communities: theoretical foundations. Automobile roads and road construction. Issue 117. Part 2. Pp. 213–219. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.2/213.pdf [in Ukrainian].

26. Mamonov, K., Bieliatynskyi, A., Gryanyk, V., Kanivets, O., Kovalenko, L. (2025) Geospatial modeling of directions for the development and implementation of the land administration system at the regional level. Civil and Environmental Engineering. Vol. 0. Issue 0. https://doi.org/10.2478/cee-2025-0072

27. Goi, V., Mamonov, K., Burvikov, I. (2024) Geoinformation systems in the process of normative monetary valuation of land outside settlements: prospects and challenges. Spatial Development. № 10. Pp. 427–440. http://spd.knuba.edu.ua/article/view/324135 [in Ukrainian].

28. Mamonov, K., Goi, V., Khariv, V. (2025) GIS in the system of geospatial monitoring of land use for residential and public development in regions. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. Issue 213. P. 92–101. https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_213-doi.pdf [in Ukrainian].

29. Mamonov, K., Vatulia, G., Viatkin, R., Nelin, E. (2025) Directions and features of land use for the reconstruction of transport infrastructure at the regional level in the system of geo-ecological monitoring. Municipal Economy of Cities. Volume 4. Issue 192. P. 272–278. https://khgts.kname.edu.ua/index.php/khgts/uk/article/view/6540/6461 [in Ukrainian].

30. Mamonov, K., Goi, V., Khariv, V. (2025) Theoretical and methodological approach to assessing the formation and implementation of geospatial monitoring of land use for residential and public buildings at the regional level. Automobile roads and road construction. Issue 118. Part 1. P. 103–113. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.1/103.pdf [in Ukrainian].

ГЕОЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ У СИСТЕМІ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ

Нестеренко Світлана Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна, e-mail: NesterenkoS2208@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2288-3524

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. Визначена актуальність теми дослідження й доцільність її розробки. Мета, яка поставлена у статті, досягнута та вирішені завдання щодо: обґрунтування теоретико-методичних підходів до визначення геоекологічного моніторингу використання земель регіонів; виокремлення структурних компонентів геоекологічного моніторингу; оцінка рівня розробки й застосування геоекологічного моніторингу використання земель регіонів.

Визначені структурні елементи геоекологічного моніторингу використання земель регіонів: формування й застосування інформаційного забезпечення; створення просторового забезпечення; формування кількісної основи для оцінки чинників формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель регіонів; визначення та оцінка чинників формування й застосування

геоекологічного моніторингу; застосування математичного інструментарію; використання геоінформаційних систем для геоекологічного моніторингу використання земель регіонів; прийняття обґрунтованих рішень.

У результаті дослідження запропоновано визначення геоекологічного моніторингу використання земель регіонів, як система, що складається із сукупності просторових, інформаційних, інструментальних, оцінних структурних елементів, взаємодія яких здійснюється із застосуванням математичного моделювання й геоінформаційних систем, що дозволяє сформувати моніторингове середовище для прийняття рішень.

Встановлено, що у більшості регіонів визначено посередній рівень формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель. Проте на низькому рівні встановлено формування й застосування геоекологічного моніторингу у Донецькому, Запорізькому, Луганському, Сумському, Херсонському регіонах. Отримані значення свідчать про необхідність здійснення дій для зростання рівня ефективності використання земель регіонів й впровадження моніторингових технологій, зміни екологічної політики й забезпечення безпекових процедур, із застосуванням можливостей сучасних геоінформаційних систем.

Ключові слова: геоекологічний моніторинг, використання земель, математичне моделювання, оцінка, регіональний рівень.

Перелік посилань

1. Lindenmayer D.B., Likens G.E. Adaptive monitoring – a new paradigm for long-term studies and monitoring. Trends in Ecology & Evolution. 2009. № 24(9). Pp. 482–486. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.005

2. Rouse J.W., Haas R.H., Deering D.W., Schell J.A., Harlan J.C. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation; Texas A&M University Remote Sensing Center: College Station, TX, USA, 1974. 390 p. URL: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19750020419/downloads/19750020419.pdf

3. Sun X., Wang L., Li Y., Yang Q., Wu Z., Gao F., Lu L., Xiao F., Ling F. Remote Sensing Assessment of the Water Conservation Function of Ecological System in Dabieshan Mountain Area of Hubei Province. Resources and environment in the yangtze basin. 2023. Vol. 32. Issue 3. Pp. 487–497. URL: https://yangtzebasin.whlib.ac.cn/EN/abstract/abstract13482.shtml

4. Мамонов К.А., В'яткін Р.С., Чайка Т.М. Математичне моделювання чинників використання земель промисловості регіонів. Науковий вісник будівництва. 2025. Вип. № 112. С. 362–368. URL: https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1898/1819

5. Мамонов К.А., Штерндок Е.С., Гой В.В., Радзінська Ю.Б. Математичне моделювання чинників ефективності використання земель регіонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2025. Вип. 117. Ч. 1. С. 157–165. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.1/157.pdf

6. Мамонов К.А., Гой В.В., Вяткін Р.С., Мамонов В.К. Характеристика математичних методів і моделей для аналізу ринку нерухомості. Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура. 2025. Том 1. Вип. 189. С. 291–295. URL: https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6479/6399

7. 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

8. 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

9. Мамонов К.А., Радзінська Ю.Б., Фролов В.О., Євдокімов А.А., Штерндок Е.С. Застосування геоінформаційних систем і технологій у містобудівному моніторингу територіальних громад:

теоретичні засади. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2025. Вип. 117. Ч. 2. С. 213–219. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.2/213.pdf

10. Mamonov K., Bieliatynskyi A., Gryanyk V., Kanivets O., Kovalenko L. Geospatial modeling of directions for the development and implementation of the land administration system at the regional level. Civil and Environmental Engineering. 2025. Vol. 0. Issue 0. DOI: https://doi.org/10.2478/cee-2025-0072

11. Гой В.В., Мамонов К.А., Бурвіков І.Ю. Геоінформаційні системи в процесі нормативної грошової оцінки земель за межами населених пунктів: перспективи та виклики. Просторовий розвиток. 2024. №10. С. 427–440. URL: http://spd.knuba.edu.ua/article/view/324135

12. Мамонов К.А., Гой В.В., Харів В.В. ГІС у системі геопросторового моніторингу використання земель житлової та громадської забудови регіонів. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2025. Вип. 213. С. 92–101. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_213-doi.pdf

13. Мамонов К.А., Ватуля Г.Л., В'яткін Р.С., Нелін Є.О. Напрями та особливості використання земель для відбудови транспортної інфраструктури на регіональному рівні у системі геоекологічного моніторингу. Комунальне господарство міст. 2025. Том 4. Випуск 192. С. 272–278. URL: https://khgts.kname.edu.ua/index.php/khgts/uk/article/view/6540/6461

14. Мамонов К.А., Гой В.В., Харів В.В.Теоретико-методичний підхід до оцінки формування та реалізації геопросторового моніторингу використання земель житлової й громадської забудови на регіональному рівні. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2025. Вип. 118. Ч. 1. С. 103–113. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.1/103.pdf

УДК 625.745.2
UDC 625.745.2

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-166-174

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВОДОПРОПУСКАЛЬНИХ СПОРУДАХ ІЗ УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ЗМІН НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОМПЛЕКСУ “НАСИП — ТРУБА — ОСНОВА”

RESEARCH OF HYDRAULIC PROCESSES IN WATER PASSAGE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT DYNAMIC CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF THE COMPLEX “EMBANKMENT — CULVERT — FOUNDATION”



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



Токін Олександр Павлович*, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство», e-mail: a2atp@meta.ua, тел. (044)2804259, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 322,*

https://orcid.org/0000-0002-7353-4228



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

Анотація: У статті наведено результати експериментальних досліджень гідравлічних процесів у водопропускальних трубах при зміні їхнього напружено-деформованого стану. Розглянуто основні режими протікання потоку (безнапірний, напівнапірний, напірний) та визначено умови їх виникнення. Особливу увагу приділено фізичному моделюванню взаємодії в системі «насип — труба — основа» на базі лабораторії гідравліки НТУ з використанням критеріїв подібності Ньютона та Фруда. Експериментально встановлено залежність величини підпору (H) від деформацій (прогинів) труби. Виявлено, що прогин труби вгору призводить до суттєвого збільшення підпору (до 67%), тоді як

прогин донизу на початкових етапах сприяє зростанню пропускної здатності. Отримані дані дозволяють враховувати динамічні зміни геометрії споруди при оцінці її гідравлічної ефективності.

Ключові слова: водопропускні споруди, гідравлічні режими, напружено-деформований стан, фізичне моделювання, критерій Фруда, прогин труби, пропускна здатність, труба, кавітація.

Вступ. Надійність функціонування транспортних споруд значною мірою залежить від ефективності роботи водопропускних труб, що інтегровані в тіло насипу. Традиційні методи гідравлічного розрахунку базуються на припущенні про незмінність геометричних параметрів труби протягом усього періоду експлуатації. Проте в реальних умовах взаємодія в комплексі «насип — труба — основа» призводить до виникнення динамічних змін напружено-деформованого стану (НДС), що спричиняє деформації поперечного та поздовжнього профілів споруди.

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю встановлення кількісних зв'язків між механічними деформаціями труби та її гідравлічними характеристиками. Зміна похилу або виникнення прогинів внаслідок нерівномірного осідання основи безпосередньо впливає на швидкість потоку та рівень підпору перед спорудою.

Мета роботи: Експериментальне дослідження впливу величини та напрямку прогину водопропускної труби на її гідравлічні показники в різних режимах течії, а також обґрунтування методики фізичного моделювання таких процесів із дотриманням принципів динамічної подібності.

Виклад основного матеріалу. По режиму протікання потоку труби можуть бути безнапірними, напівнапірними і напірними (рис. 1).

Для визначення виду труб по умовам їх гідравлічної роботи необхідні певні розрахунки.

Безнапірний режим протікання потоку характеризується наявністю вільної поверхні потоку по всій протяжності труби. Труба працює в безнапірному режимі, якщо:

$$H<1{,}2h_{mp}, \tag{1}$$

де H – напір води перед трубою;
h_{mp} – висота труби.

Напівнапірний режим протікання потоку в трубі має дві ділянки: ділянка на вході і основна ділянка.

Вхідна ділянка характеризується затопленим входом в трубу, де потік доторкається до стінок труби по усьому периметру. Вхідна ділянка закінчується стискаючим розрізом з глибиною $h_c<h_{kp}$, потім потік протікає з вільною поверхнею. Умовою існування напівнапірного режиму є критерій:

$$H>h_{mp}. \tag{2}$$

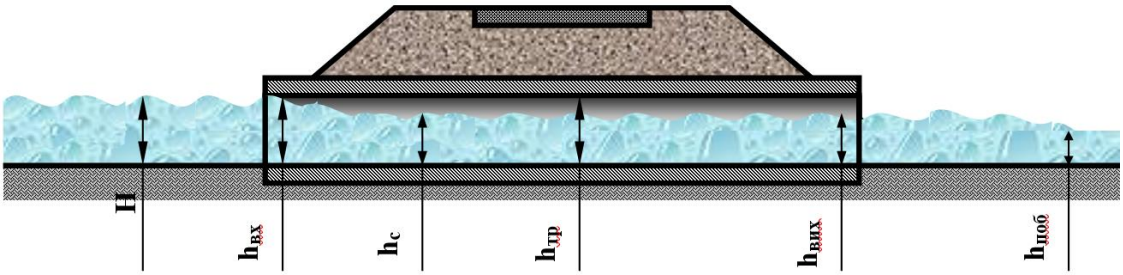
Відмітимо, що пропускна здатність напівнапірних труб більша, ніж безнапірних. Напірний режим протікання потоку в трубах характеризується тим, що весь поперечний переріз по всій довжині труби повністю заповнений водою. В цьому випадку крива вільної поверхні може бути лише на вхідній ділянці труби, де має значення вплив кривизни потоку. При напірному режимі труби володіють найбільшою пропускною здатністю.

Напірний режим має місце при одночасному виконанні трьох умов:

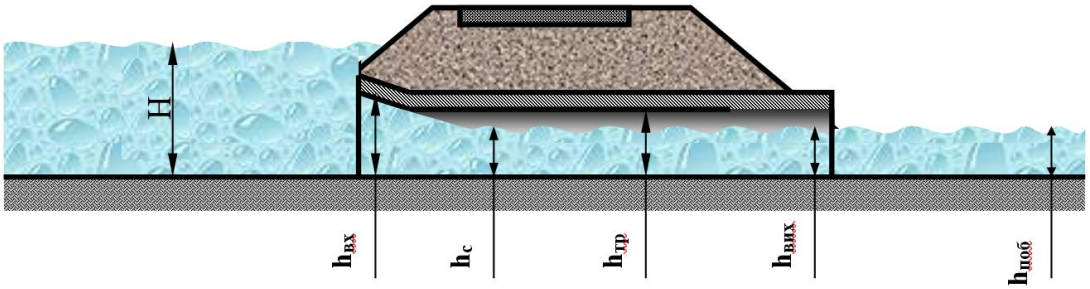
1. Вхідний оголовок повинен бути обтічним;
2. $H>1{,}4h_{mp}$;
3. $i_{mp}>i_f$;

де i_f – похил тертя, $i_f=2Q/(\mu^2W^2)$;
i_{mp} – похил дна труби.

1. Безнапірний режим течії $H \leq 1{,}2h_{тр}$



2. Напівнапірний режим течії $H \geq 1{,}2h_{тр}$



3. Напірний режим течії $H > 1{,}4h_{тр}$

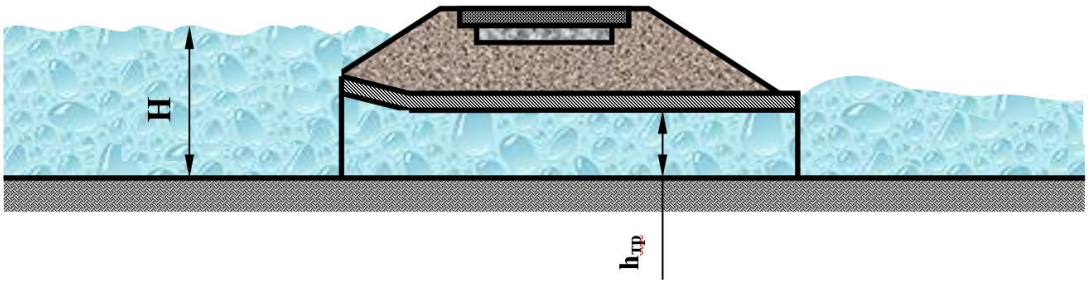


Рисунок 1– Гідравлічні характеристики системи “насип – труба - основа”
Figure 1 – Hydraulic characteristics of the “fill - culvert - foundation“ system

В області, яка може бути названа “моделюванням”, яка відноситься до досліджень тих чи інших фізичних явищ, необхідно розрізняти два різних види моделювання:

1-й вид моделювання – так зване фізичне моделювання: в цьому випадку на моделі відображується явище, яке вивчається із збереженням його фізичних властивостей.

2-й вид моделювання – математичне моделювання: в цьому випадку дослідження натурних станів чи процесів виконується шляхом вивчення явищ, які мають інший фізичний зміст, але описані тими ж математичними залежностями (які описують натурні явища).

Модель водопропускної труби, яка використовується в дослідженнях, базується на фізичних явищах. Процеси, які проходять в деформованій трубі, також механічно подібні в тому випадку, якщо в них подібне відношення усіх геометричних елементів – розмірів, відстаней, переміщень, однакове відношення щільностей і сил, які діють в певних точках і напрямках.

Для повного гідродинамічного уподібнення потоків необхідне їх геометричне і динамічне уподібнення.

Два потоки будуть геометрично подібними, якщо між їхніми певними лінійними розмірами існує постійне співвідношення:

$$L_н/L_м=a, \quad (3)$$

де a – лінійний масштаб, який показує в скільки разів розміри моделі $L_н$ зменшені порівняно з розмірами натури $L_м$.

Повинно бути також постійне співставлення площин $W_н/W_м=a^2$ і об'ємів $W_н/W_м=a^3$.

Два потоки будуть кінематично подібними, якщо лінії току на моделі і натурі в точках простору пов'язані масштабами:

$$V_н/V_м=a_{vp}, \tag{4}$$

де a_v – масштаб швидкості.

При цьому масштаб прискорення:

$$a_j=j_н/j_м=a_v^2/a. \tag{5}$$

Для динамічного уподібнення необхідно, щоб усі сили схожої природи, які діють в подібних точках моделі і натурі на частини рідини, відрізнялись між собою лише постійними масштабами. Якщо на потік в натурі діє сила $F_н$, а на подібний елемент потоку діє сила $F_м$, то:

$$F_н/F_м=a_F. \tag{6}$$

Вибір множників a, a_v, a_F не є випадковим, так як між ними існує залежність:

$$a_F=a_\rho a^2 a_v^2. \tag{7}$$

Цей вираз має назву – закон уподібнення Ньютона в масштабних множниках.

Виражаючи масштабні множники відповідними відношеннями, отримуємо:

$$F_н/(\rho_н l_н^2 v_н^2)=F_м/(\rho_м l_м^2 v_м^2/). \tag{8}$$

або:

$$Ne_н=Ne_м, \tag{9}$$

де N – критерій Ньютона.

$$Ne=idem. \tag{10}$$

Умовою гідродинамічного уподібнення є рівність на моделі і в натурі усіх сил (ваги, тиску, інерції, тертя і ін.). Внаслідок фізичних особливостей цих сил повне уподібнення усіх сил практично не можна досягти і є необов'язковим. Тому встановлюють критерій уподібнення для часткових випадків.

Критерій Фруда.

Якщо переважає дія сил ваги, то необхідне виконання наступної умови:

$$a_v^2/a_g a=1. \tag{11}$$

чи

$$(V_н^2/gl_н)=(V_м^2/gl_м)=F_r, \tag{12}$$

Де $F_г$ – число Фруда.

Отже, геометрично подібні потоки можна рахувати гідродінамічно подібними, якщо будуть рівні числа Фруда для схожих розрізів обох потоків:

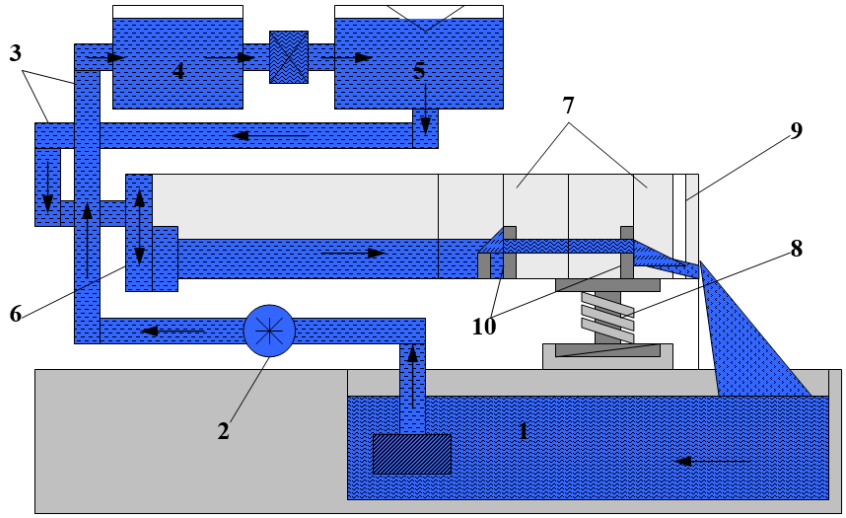
$$V_н = V_м a^{1/2}. \quad (12)$$

$$Q_н = Q_м a^{2.5}. \quad (13)$$

При моделюванні по Фруду вірне рівняння гідравлічних похилів $I_н = I_м$, що відповідає турбулентному режиму тиску в області опору.

Експериментальні дослідження були проведені в лабораторії гідравліки НТУ. Схема експериментальної установки наведена на рис. 2 [6].

Модель була встановлена в лозі. Ширина лога 1,0 м, довжина – 8,0 м. Для моделі водопропускної труби була використана полівінілхлоридна труба з внутрішнім діаметром 6.0 см, довжина труби – 1,4 м. Моделювання укосів проводилось склопластиком. Оголовок – розтрубний. Труба прогиналась за допомогою бруса, який був улаштований в верхній частині лога. В якості вимірювання прогинів труби використовувався штангенциркуль. Вимірювання проводились біля вхідної частини труби і на виході. Результати вимірювання підпору і глибини на виході при різних значеннях прогинів приведені в таблиці 1. За нульовий рахунок був прийнятий h_0=183 мм.



1 – резервуар; 2 – насосний пристрій; 3 – водопідводящі труби; 4 – напірний бак; 5 – бак з мірним водозливом; 6 – заспокоювач; 7 – скляний лоток; 8 – пристрій для виміру похилу; 9 – регульовані жалюзі; 10 – модельований пристрій.

Рисунок 2 – Схема стенду для проведення експерименту
Figure 2 – Diagram of the stand for conducting the experiment

Таблиця 1 – Результати виміру підпора і глибини на виході при різноманітних значеннях прогинів.

Table 1 – Results of measuring the support and depth at the outlet for various deflection values.

Верхніх		Нижніх	
f, см	*h*, мм	*f*, см	*h* (глибина), мм
0	183	0	239
4	210	4	232
2,4	202	2,4	238
1,4	194	1,4	238
0,7	190	0,7	239
0	183	0	239
-1,2	179	-1,2	239,5
-2,4	178	-2,4	241
-3,5	176,5	-3,5	247
-5,6	177	-5,6	245
$h_{дна}$=137 мм	Q=3,65 м^3/с	$h_{дна}$=222 мм	
Примітка: В таблиці 1.1 зі знаком "-" приведені значення прогинів труби до низу, зі знаком "+" – до верху.			

На основі даних (рис. 3) були побудовані графіки залежності підпору H від прогину труби (рис. 4).

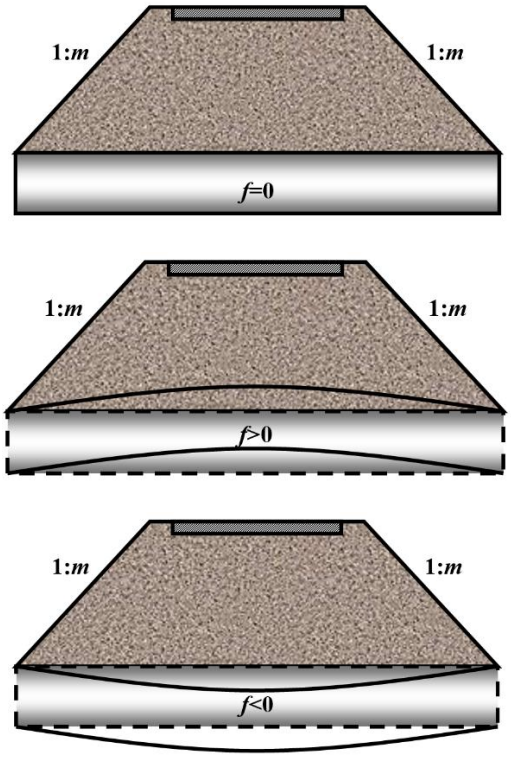


Рисунок 3 – Дослідження течії води в трубі в процесі її деформування

Figure 3 – Study of water flow in a pipe during its deformation

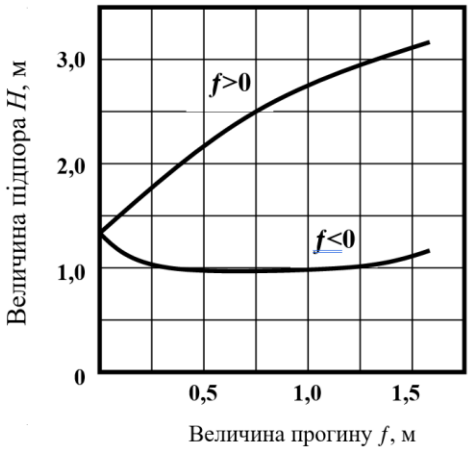


Рисунок 4– Графік залежності величини підпору від прогину

Figure 4 – Graph showing the dependence of the backwater height on the deflection

Із графіків видно, що підпір збільшується при прогині труби до верху. Значення підпору H_0=1,2 м. При прогині труби (f=1,5 м) підпір збільшився і став H=1,0 м, що складає 67%.

При прогині труби (f=0,5 м) до низу, підпір Н падає. Його значення складає Н=1,0 м. Подальший прогин труби до значення (f=1,25 м) не викликає зміну підпору в системі. І лише на ділянці прогину труби (f від 1,25 до 1,75 м) підпір повільно збільшується (H=1,25м).

При прогині труби до низу збільшується прямий похил біля вхідного оголовка. Швидкості на вході збільшуються, а значить збільшується пропускна здатність труби. Підпір падає. При прогині труби на ⅔d, режим протікання потоку в трубі змінюється. Приблизно на $^1/_2$ в трубі відбувається кавітація струменя і подальший прогин труби вірний результат не дає. При вивченні руху потоку в трубі при прогині ⅔ d необхідно враховувати кавітацію.

Висновки. Проведене фізичне моделювання підтвердило, що деформації системи «насип — труба — основа» є критичним фактором, який змінює розрахунковий гідравлічний режим роботи споруди.Встановлено, що прогин труби вгору (випор основи або нерівномірне осідання країв) спричиняє різке зростання рівня підпору. Зокрема, при прогині f = 1,5м (у масштабі натури) значення підпору зростає до 67%, що створює ризик переливу через гребінь насипу.Доведено, що помірний прогин труби донизу збільшує пропускну здатність за рахунок зростання місцевого похилу біля вхідного оголовка, що супроводжується падінням рівня підпору.Виявлено граничне значення деформації (близько 2/3d), при якому подальший прогин донизу призводить до виникнення кавітаційних явищ та розриву потоку, що робить стандартні гідравлічні залежності недійсними.Результати дослідження вказують на необхідність врахування можливих деформацій труби вже на стадії проектування, особливо для об’єктів, що зводяться на слабких ґрунтах або в умовах високих динамічних навантажень.

Перелік посилань

1. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування / Мінрегіонбуд України. — К. : ДП «Укрархбудінформ», 2009. — 151 с.

2. Перешивкін С. І. Гідравліка : навч. посіб. / С. І. Перешивкін. — К. : Національний транспортний університет, 2013. — 216 с.

3. Славінська О. М. Проектування водовідводу з автомобільних доріг : навч. посіб. / О.М. Славінська. — К. : НТУ, 2011. — 248 с.

4. Рябенко О. А. Гідравліка : підручник / О. А. Рябенко. — Рівне : НУВГП, 2011. — 445 с.

5. ДСТУ 8746:2017. Труби водопропускні залізобетонні круглі для автомобільних доріг і залізниць. Технічні умови. — К. : ДП «УкрНДНЦ», 2018. — 34 с.

6. Большаков В. А., Курганович А. А. Гідрологічні та гідравлічні розрахунки малих дорожніх споруд. – Київ: Вища школа, 1983. – 279 с.

7. Безуглий А. О. Методи оцінки експлуатаційного стану водопропускних споруд на автомобільних дорогах / А. О. Безуглий // Дороги і мости. — 2021. — Вип. 24. — С. 15–28.

8. Chaudhry M. H. Open-Channel Flow / M. H. Chaudhry. — 2nd ed. — New York : Springer, 2008. — 561 p. (Міжнародне авторитетне видання з гідравліки відкритих потоків).

9. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. — 9th ed. — Washington, DC : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020. (Міжнародний стандарт щодо проектування споруд, включаючи водопропускні труби).

10. 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.

11. Чечуга О.С., Каськів В.І., Лисенко О.П., Лисенко А.М. Аналіз існуючих теоретичних методів визначення навантажень, які діють на водопропускні труби в земляному полотні автомобільних доріг. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 117.2. НТУ, Київ, 2025. С.87 – 96. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.2/87.pdf.

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

RESEARCH OF HYDRAULIC PROCESSES IN WATER PASSAGE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT DYNAMIC CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF THE COMPLEX “EMBANKMENT — CULVERT — FOUNDATION”

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*

Oleksndr Tokin P., Ph.D., Associate Professor, National Transport University, Professor of Production, Repair and Materials Science Department, e-mail:*a2atp@meta.ua*,tel (044) 280-42-59, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovich Pavlenko str. 1, of. 322, *https//orcid.org/0000-0002-7353-4228*

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.*

Summary. The article presents the results of experimental studies regarding hydraulic processes in culverts under conditions of varying stress-strain states. The main flow regimes—free-flow, semi-pressure, and full-pressure—are examined, and the conditions for their occurrence are defined. Particular attention is devoted to the physical modeling of the interaction within the "embankment – pipe – foundation" system at the National Transport University (NTU) hydraulics laboratory, utilizing Newton and Froude similarity criteria. The dependence of the water head (H) on pipe deformations (deflections) has been experimentally established. It was revealed that upward pipe deflection leads to a significant increase in the water head (up to 67%), whereas downward deflection initially promotes an increase in discharge capacity. The obtained data allow for the consideration of dynamic changes in structure geometry when evaluating its hydraulic efficiency.

Keywords: culverts, hydraulic regimes, stress-strain state, physical modeling, Froude criterion, pipe deflection, discharge capacity, pipe, cavitation..

References

1. DBN V.2.3-22:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia [Transport structures. Bridges and pipes. Basic design requirements]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.

2. Pereshyvkin, S. I. (2013). Hidravlika: navch. posib. [Hydraulics: Tutorial]. Kyiv: National Transport University.

3. Slavinska, O. M. (2011). Proektuvannia vodovidvodu z avtomobilnykh dorih: navch. posib. [Designing road drainage: Tutorial]. Kyiv: NTU.

4. Riabenko, O. A. (2011). Hidravlika: pidruchnyk [Hydraulics: Textbook]. Rivne: NUWMPE.

5. DSTU 8746:2017. Truby vodopropuskni zalizobetonni kruhli dlia avtomobilnykh dorih i zaliznyts. Tekhnichni umovy [Reinforced concrete circular culverts for highways and railways. Specifications]. Kyiv: SE "UkrNDNC".

6. Bolshakov, V. A., & Kurhanovych, A. A. (1983). Hidrolohichni ta hidravlichni rozrakhunky malykh dorozhnikh sporud [Hydrological and hydraulic calculations of small road structures]. Kyiv: Vyshcha Shkola.

7. Bezuglyi, A. O. (2021). Metody otsinky ekspluatatsiinoho stanu vodopropusknykh sporud na avtomobilnykh dorohakh [Methods for assessing the operational state of culverts on highways]. Dorohy i mosty [Roads and Bridges], 24, 15–28.

8. Chaudhry, M. H. (2008). Open-Channel Flow (2nd ed.). New York: Springer.

9. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. (2020). 9th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

10. Chechuha, O. S., Kaskiv, V. I., Lysenko, O. P., & Lysenko, A. M. (2011). Deformatsii, yaki vyznachaiutsia umovamy statychnoi roboty truby v konstruktsii “nasyp – truba – osnova” [Deformations determined by the static operating conditions of the pipe in the "embankment – pipe – foundation" structure]. Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo [Motorways and Road Construction], 82, 173–180.

11. Chechuha, O. S., Kaskiv, V. I., Lysenko, O. P., & Lysenko, A. M. (2025). Analiz isniuiuchykh teoretychnykh metodiv vyznachennia navantazhen, yaki diiut na vodopropuskni truby v zemlianomu polotni avtomobilnykh dorih [Analysis of existing theoretical methods for determining loads acting on culverts in the roadbed of motorways]. Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo [Motorways and Road Construction], 117.2, 87–96.

12. MR V.2.3-37641918-932:2023. Metodychni rekomendatsii z proiektuvannia vodopropuskalnykh trub na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia [Methodological recommendations for the design of culverts on public motorways].

УДК 625.745 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-175-183**
UDK 625.745

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ТА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ВОДОПРОПУСКНИХ СПОРУД

SYSTEMATIZATION OF APPROACHES TO HYDRAULIC CALCULATION AND SELECTION OF CULVERT PARAMETERS



Онищенко Артур Миколайович, *доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,*
e-mail: ***onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com****, тел. +380687771899,*

http://orcid.org/0000-0002-1040-4530



Духненко Яна Сергіївна, *аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,*
e-mail: ***yana.duhnenko@gmail.com****, тел. +380638352205,*

https://orcid.org/0009-0007-8742-7718

Анотація: У статті розглянуто методологію проєктування водопропускних споруд, що поєднує гідравлічні та гідрологічні аспекти. Описано фактори впливу на пропускну здатність споруд, зокрема режими регулювання на вході та виході. Проаналізовано типи водопропускних споруд, матеріали їх виготовлення та особливості розташування відносно русла водотоку. Значну увагу приділено вимогам до вихідних даних для проєктування та використанню автоматизованих систем розрахунку. Висвітлено питання врахування акумуляції води перед спорудою та методи оцінки ризиків при виборі розрахункових витрат.

Ключові слова: водопропускні споруди, водопропускні труби, бетон, проєктування, б'єф

Вступ. Проєктування водопропускних споруд займає значне місце у загальному обсязі проєктування автомобільних доріг, каналів та залізниць. Методика розрахунку базується в основному на гідравлічних методах, що дає можливість застосування комп‘ютерних методів створення автоматичних програм із застосуванням інформаційних систем. Сучасна методологія проєктування має чіткий, зручний для використання формат збору гідрологічного та гідравлічного матеріалу та апарату

для розрахунків. Вона призначена для фахівців, які добре розуміють основні гідрологічні та гідравлічні методи. Досвідчений проєктувальник, як передбачається, здатний розуміти різноманітні умови потоку, які можливі в цих складних гідротехнічних спорудах, та вносити відповідні корективи.

Водночас, недосвідчений проєктувальник та ті, хто не знайомий з гідравлічними явищами, повинні використовувати автоматизовані системи з обережністю.

Представлена розробка базується на комплексній публікації серії «Гідравлічне проєктування» № 5 (HDS-05), яка поєднує інформацію з циркулярів HEC № 5, № 10 та № 13, а також новіші дані від урядових органів та університетів [1,3,5].

Мета роботи - систематизувати підходи до гідравлічного розрахунку та вибору параметрів водопропускних споруд (ВП).

Виклад основного матеріалу.

1. Фактори впливу на гідравлічну роботу споруди

Розрахунок водопропускних споруд включає визначення необхідного діаметру труби для забезпечення пропускної здатності та безпечної роботи системи. Гідравлічна робота ВП залежить від режиму протікання: регулювання на вході або регулювання на виході.

Оскільки регулювання на виході знаходиться на кінці нижче за течією, на верхів'я впливають усі фактори, зазначені в таблиці 1. Фактори на вході, що впливають на характеристики при керуванні входом, також впливають на ВП при керуванні вихідним отвором.

Таблиця 1 – Фактори впливу щодо проєктування водопропускних споруд
Table 1 – Influence factors regarding the design of culverts

Фактор	Регулювання входу	Регулювання виходу
Напір верхнього б'єфу	X	X
Площа труби	X	X
Форма	X	X
Конфігурація входу	X	X
Шорсткість труби		X
Довжина ВП		X
Ухил ВП	X	X
Напір нижнього б'єфа		X
Примітка: Для регулювання на вході коефіцієнти площі та форми стосуються площі та форми входу. Для регулювання на виході вони стосуються площі та форми ствола		

Основні характеристики, що впливають на пропускну здатність [6,7,9]:

Шорсткість поверхні залежить від матеріалу, який використовується для виготовлення труби. До матеріалів належать бетон, гофрований метал та пластик. Шорсткість поверхні представлена коефіцієнтом гідравлічного опору, таким як значення Маннінга n. Додаткове обговорення джерел та виведень значень Маннінга n міститься в Додатку Б. Значення TypicaI Меннінга n, що використовуються для проєктування водопропускних труб, становлять n = 0,012 для водопропускних труб з гладкими стінками та n = 0,024 для водопропускних труб з шорсткою стінкою (гофрованих).

Площа водопропускних споруд залежить від розмірів водопропускної труби. Більша площа водопропускних споруд забезпечить більший потік.

Форма водопропускних споруд залежить від типу та матеріалу водопропускної труби. Залежно від розташування центру ваги для заданої площі, найефективнішою формою є арка, потім арка, а далі - арка.

Довжина водопропускних споруд – це загальна довжина водопропускної труби від входу до виходу з неї. Оскільки розрахункова висота арки та ухил впливають на фактичну довжину, для початку процесу проєктування зазвичай необхідне наближене значення довжини ВП.

Ухил водопропускних споруд – це фактичний ухил водопропускної труби. Ухил водопропускних споруд часто збігається з природним ухилом потоку. Однак, коли вхід водопропускної труби піднімається або опускається, ухил водопропускних споруд відрізняється від ухилу потоку. Ухил не є фактором при розрахунку втрат водопропускних споруд для типів потоку USGS 4, 6 та 7; але є фактором при розрахунку типів потоку USGS 2 та 3, коли розраховується профіль поверхні води.

Висота нижнього б'єфа базується на висоті поверхні води нижче за течією. Для визначення висоти нижнього б'єфа використовуються розрахунки підпору на основі контролю нижче за течією, наближення нормальної глибини або польових спостережень.

2. Типи водопропускних споруд та матеріали

ВП - це гідравлічно короткий трубопровід, який передає потік через дорожню насип. Вибір типу ВП базується на вартості, обмеженнях рівня води та висоті насипу. Найпоширеніші форми включають круглу, прямокутну (коробчасту), еліптичну та аркову (рис. 1) [10,11].

.

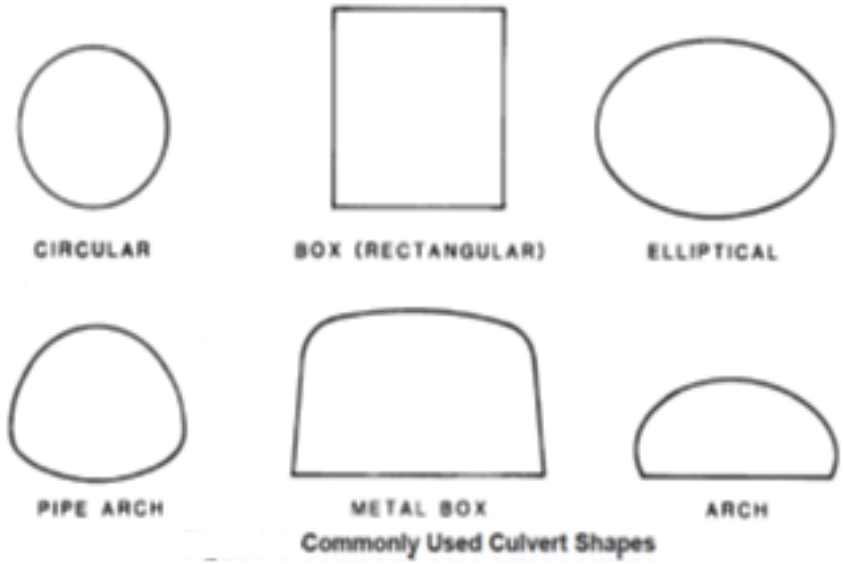


Рисунок 1 **–** Типові форми ВП
Figure 1 **–** Typical forms of culverts

Трьома найпоширенішими матеріалами є бетон, гофрований алюміній та гофрована сталь. Металеві ВП можуть бути облицьовані асфальтобетоном для захисту.

Важливим елементом є конфігурація вхідного отвору. Конфігурація вхідного краю є основним фактором, що впливає на регулювання вхідним отвором. Зменшення стиснення потоку на вході (наприклад, за допомогою скошених країв) збільшує пропускну здатність (рис. 2,3,4) [10,11].

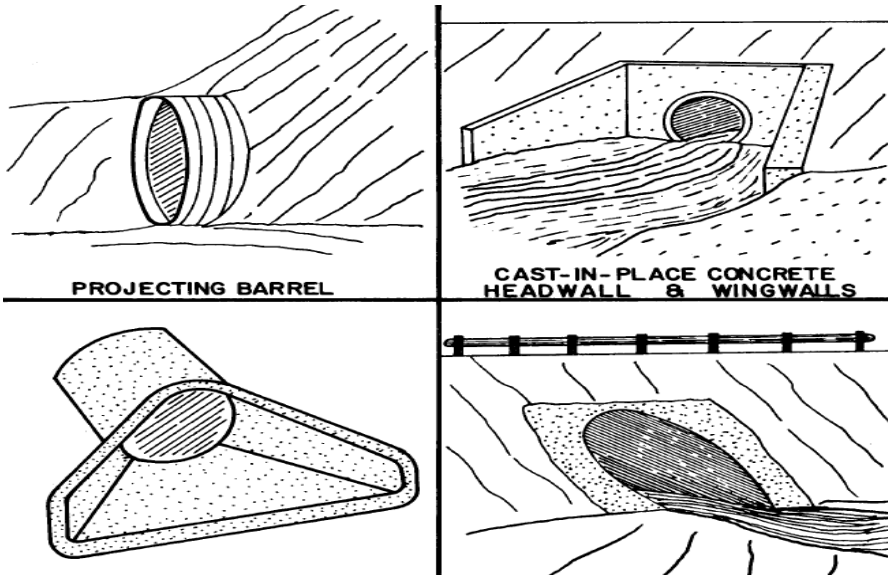


Рисунок 2 – Типові конструкції вхідних та вихідних отворів ВП
Figure 2 – Typical designs of culvert inlets and outlets

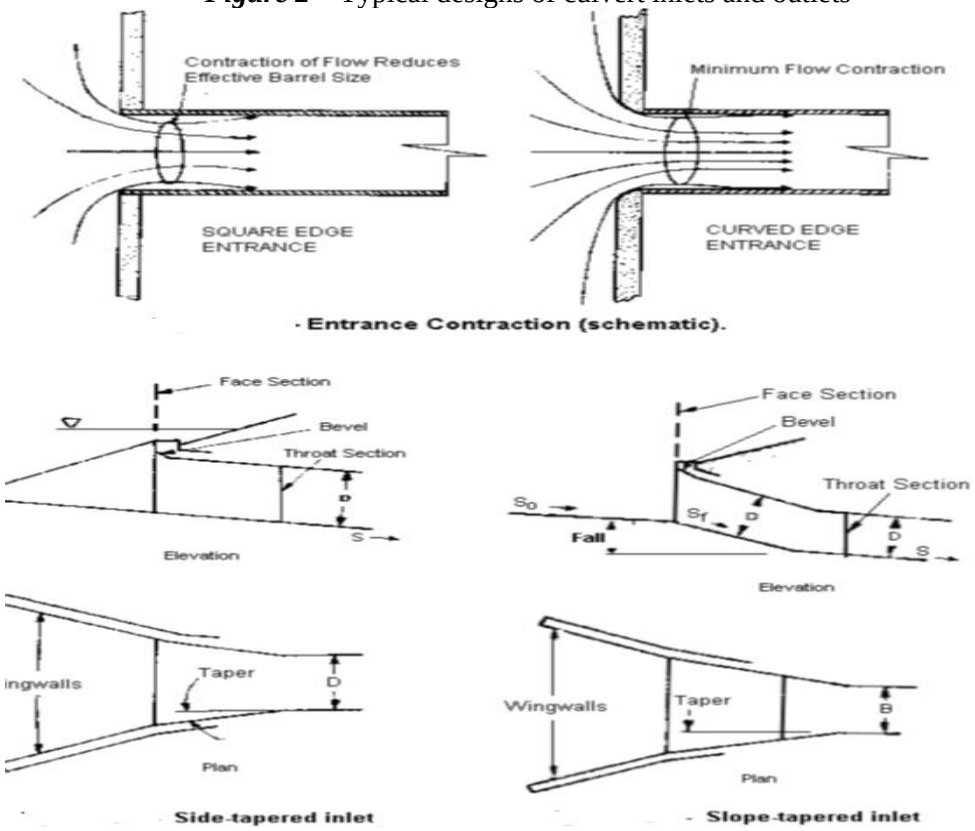


Рисунок 3 – Схема стиснення потоку на вході
Figure 3 – Diagram of flow contraction at the inlet

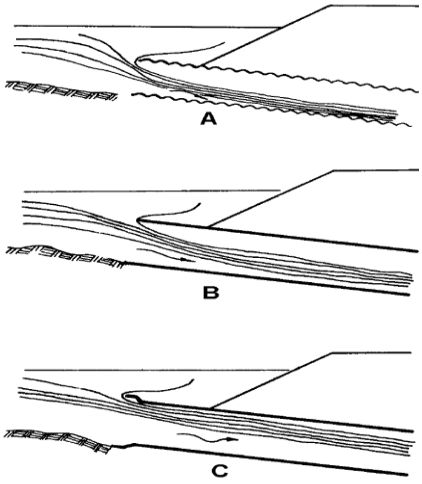


Рисунок 4 – Стиснення потоку різними варіантами матеріалів висунутих вхідних отворів ВП
Figure 4 – Flow contraction by various options of materials for projecting culvert inlets

3. Вимоги до даних для проєктування

Ефективне проєктування вимагає збору детальної інформації про гідрологію, топографію та характеристики водотоку. Перед зверненням до інформаційних систем (ІС) необхідно виконати вимоги до збору даних (таблиця 2) [2,4].

Таблиця 2 – Вимоги до даних для проєктування водопропускних споруд
Table 2 – Data requirements for culvert design

Дані	Джерело даних
ГІДРОЛОГІЯ Піковий потік	Аналіз даних водомірних постів або розрахунок за допомогою формули співвідношення, рівнянь регресії тощо.
Перевірка потоків	Те саме, що й для пікового потоку.
Гідрографи (якщо використовується маршрут зберігання)	З інформації водомірних постів або синтетичних методів обробки, таких як метод Снайдера або комп'ютерні моделі.
ДАНІ ПРО ДІЛЯНКУ. Розташування ВП.	На основі характеристик ділянки, включаючи природний переріз потоку, ухил та виправлення.
Дані про водний шлях. Поперечні перерізи. Поздовжній ухил. Опір потоку. Ділянка НБ Накопичення у ВБ	Польове дослідження або топографічні карти. Спостереження, фотографії або методи розрахунку. Польове дослідження або топографічні карти.
Ділянка НБ Накопичення у ВБ	Польове дослідження або топографічні карти.
Дані про дорогу. Поперечний переріз. Плани дороги. Профіль. Довжина ВПу.	Плани дороги.
Проектування верхів'я. Критичні точки на дорозі. Навколишні будівлі або споруди	Плани доріг. Аерофотознімки, топографічні дослідження або топографічні карти
Нормативні обмеження	Норми щодо убезпечення заплав від повеней та небезпечних ділянок від досягнення потоку
Довільні обмеження	Державні або місцеві норми щодо облаштування ВПів

Для визначення допустимого напору (HW) необхідно враховувати економічні міркування, регуляторні обмеження та можливі збитки від затоплення. Допустиме співвідношення HW/D зазвичай коливається від 1,0 до 1,5.

4. Розташування та геометричне проєктування

В ідеалі ВП слід розташовувати в існуючому руслі каналу для мінімізації витрат. Проте, складні умови можуть вимагати переміщення русла або використання скошених конструкцій. Незначні переміщення русла є допустимими, якщо природне русло стабільне.

Ефективна конструкція повинна відповідати природному потоку за траєкторією та ухилом. Якщо вісь ВП не перпендикулярна до осі дороги, використовується поняття "кута скосу" (рис. 5) [5,6].

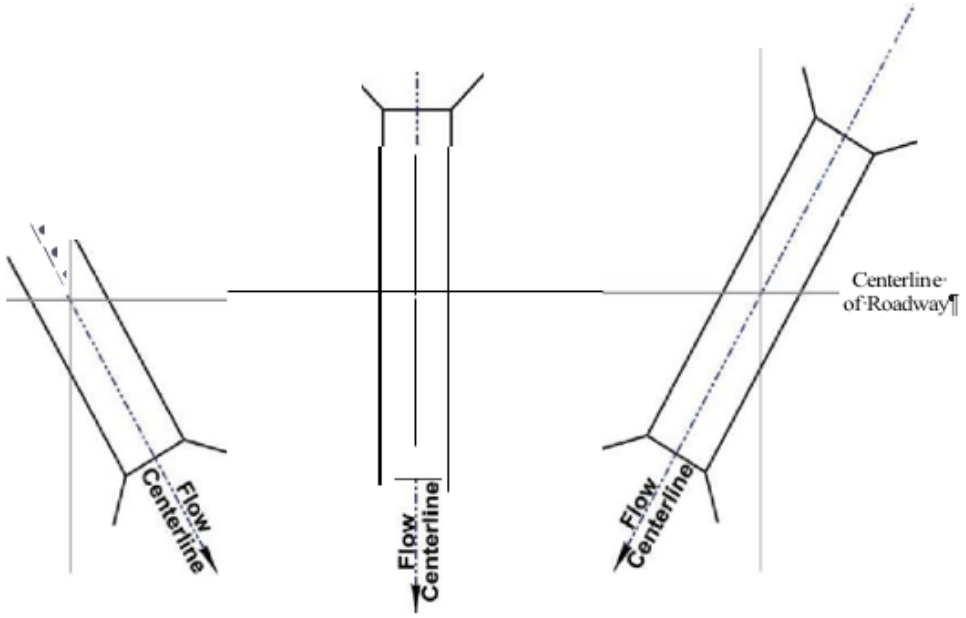


Рисунок 5 **–** Кут нахилу ствола ВП від центральної лінії дороги, дивлячись вгору або вниз за течією

Figure 5 **–** Angle of culvert barrel skew from the road centerline, looking upstream or downstream

Профіль дороги діє як перешкода, а у випадку переповнення гребінь дороги працює як аварійний водозлив.

5. Гідрологічний аналіз

Гідрологічний аналіз є першим кроком у проєктуванні та базується на оцінці пікового потоку та періоду повторення. Період повторення (наприклад, 20 років) вказує на ймовірність виникнення повені певної величини.

Для великих об'єктів може знадобитися аналіз ризиків, який збалансовує вартість споруди зі збитками від недостатньої пропускної здатності. Важливим аспектом є врахування ефекту акумуляції води перед насипом. Процес накопичення маси потоку призводить до ослаблення піку паводку через збільшення об'єму зберігання у верхньому б'єфі (рис. 6). Врахування накопичення дозволяє зменшити розмір проєктної ВП [8].

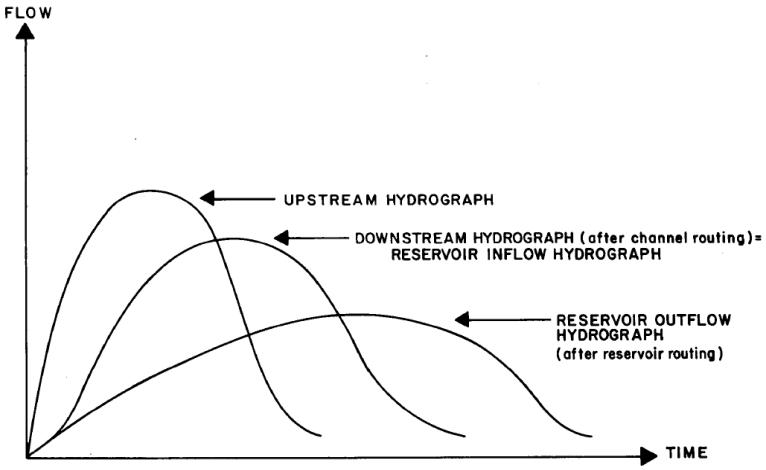


Рисунок 6 – Схема модифікації форми повеневого гідрографу
Figure 6 – Diagram of flood hydrograph shape modification

Висновки. Розроблена методологія проєктування водопропускних споруд базується на сучасних гідравлічних методах (серія HDS-5) та дозволяє враховувати широкий спектр факторів впливу, включаючи режим протікання, геометричні параметри та характеристики матеріалів. Ключовим етапом проєктування є збір точних вихідних даних про гідрологію та топографію ділянки. Помилки на цьому етапі можуть призвести до некоректного визначення пропускної здатності. Використання автоматизованих інформаційних систем значно спрощує процес розрахунку, проте вимагає від проєктувальника розуміння фізичної суті гідравлічних явищ. Врахування ефекту акумуляції паводкових вод у верхньому б'єфі є перспективним напрямком оптимізації проєктних рішень, що дозволяє зменшити розміри споруд без зниження надійності.

Перелік послань

1. Two dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model. Publication No. FHWA-RD-03-053, U.S. Department of Transportation, 2003.
2. Normann, J. M., Houghtalen, R. J., and Johnston, W. J. (1985). “Hydraulic design of highway culverts.” Hydraulic Design Series No. 5, Report No. FHWA-IP-85-15, 2001Federal Highway Administration, Washington, D.C.
3. Онищенко А.М., І.В. Башкевич, М.Н. Цивін, С.В. Кожарін. Гідравліка: практичний курс із застосуванням Mathcad: підручник. Київ: «Видавництво Людмила», 2022. 264 с. ISBN 978-617-555-007-6.
4. Онищенко А.М., Ковальчук В.В., Гаркуша М.В., Цивін М.Н., Карнаков І.А., Мошківський Р.В. Забезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах експлуатації: монографія. Київ: «Видавництво Людмила», 2023. 179 с. https://doi.org/10.32751/Mono_Zabez2023
5. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз конструктивних заходів з укріплення нижніх б’єфів гідротехнічних споруд у транспортному будівництві з дорожніх водопропускних труб. Дороги і мости. Київ, 2022. Вип. 26. С. 215–227. https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.215
6. Kovalchuk Vitalii, Karnakov Ihor, Onyshchenko Artur, Petrenko Oleksiy, Boikiv Roman. Assessing the stresses and magnitude of plastic hinge in a tunnel conduit made of precast metal corrugated structures taking into account the soil backfill parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kharkov, 2023. №4/7 (124). P. 43–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.285893.

7. Kovalchuk Vitalii. Restoration of the bearing capacity of damaged transport constructions made of corrugated metal structures / Vitalii Kovalchuk, Mykola Sysyn, Yuriy Hnativ, Artur Onyshchenko, Maksym Koval, Oleksii Tiutkin, Mariana Parneta // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – RTU Press, 2021 Volume 16 Issue 2. – pp.90 – 109. ISSN 1822-427X/eISSN 1822-4288.

8. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз спряження б'єфів гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах плоскої завдачі. Дороги і мости. Київ, 2023. Вип. 27. С. 228–244. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.228

9. Цивін М. Н., Ткаченко Н. І. Оптимальна конструкція кріплення нижнього б'єфу водопропускних споруд систем лиманного зрошення. Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Львів, 1988. Вип. 16. С. 38–43

10. Onyshchenko, A., Ostroverkh B., Potapenko, L., Kovalchuk, V., Zdolnyk, O., & Pentsak, A. (2024). Devising a procedure for integrated modeling of riverbed shape in the area of bridge crossing in order to avoid dangerous washing erosion. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(1 (127), 23–32.https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298675. https://journals.uran.ua/eejet/article/view/298675

11. Onyshchenko, A., Kovalchuk, V., Voskoboinick, V., Voskobiinyk, A., Aksonov, S., Trudenko, D., & Hrevtsov, S. (2024). Establishing patterns of change in the coefficients of reflection, transmission, and dissipation of wave energy depending on parameters of a permeable vertical wall. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(5 (130), 45–56. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309969 https://journals.uran.ua/eejet/article/view/309969

SYSTEMATIZATION OF APPROACHES TO HYDRAULIC CALCULATION AND SELECTION OF CULVERT PARAMETERS

Onyshchenko Artur M., D.Sc. (Doctor of Engineering 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, tel. +380687771899, https://orcid.org/0000-0002-1040-4530

Dukhnenko Yana S., PhD student, Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, e-mail: yana.duhnenko@gmail.com, tel. +380638352205, https://orcid.org/0009-0007-8742-7718

Abstract. The article examines the methodology for designing culverts, which combines hydraulic and hydrological aspects. Factors influencing the structures' capacity, specifically inflow and outflow control regimes, are described. Types of culverts, their manufacturing materials, and the specifics of their placement relative to the watercourse channel are analyzed. Significant attention is paid to the requirements for input data for design and the use of automated calculation systems. The issue of considering water accumulation (storage) upstream of the structure and risk assessment methods for selecting design discharges are highlighted.

Keywords: culverts, hydraulic structures, concrete, design, headwater

References

1. Two dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model. Publication No. FHWA-RD-03-053, U.S. Department of Transportation, 2003.

2. Normann, J. M., Houghtalen, R. J., and Johnston, W. J. (1985). "Hydraulic design of highway culverts." Hydraulic Design Series No. 5, Report No. FHWA-IP-85-15, 2001Federal Highway Administration, Washington, D.C.

3. Onyshchenko A.M., I.V. Bashkevych, M.N. Tsyvin, S.V. Kozharin. Hydraulics: a practical course with the use of Mathcad: textbook. Kyiv: "Vydavnytstvo Liudmyla", 2022. 264 p. ISBN 978-617-555-007-6.

4. Onyshchenko A.M., Kovalchuk V.V., Harkusha M.V., Tsyvin M.N., Karnakov I.A., Moshkivskyi R.V. Ensuring the reliability and durability of hydraulic structures in transport construction made of road culverts under operating conditions: monograph. Kyiv: "Vydavnytstvo Liudmyla", 2023. 179 p. https://doi.org/10.32751/Mono_Zabez2023

5. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Klymenko M. I. Analysis of constructive measures for strengthening the downstream channels of hydraulic structures in transport construction using road culverts. Dorohy i mosty (Roads and Bridges). Kyiv, 2022. Vol. 26. P. 215–227. https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.215

6. Kovalchuk Vitalii, Karnakov Ihor, Onyshchenko Artur, Petrenko Oleksiy, Boikiv Roman. Assessing the stresses and magnitude of plastic hinge in a tunnel conduit made of precast metal corrugated structures taking into account the soil backfill parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kharkov, 2023. №4/7 (124). P. 43–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.285893.

7. Kovalchuk Vitalii. Restoration of the bearing capacity of damaged transport constructions made of corrugated metal structures / Vitalii Kovalchuk, Mykola Sysyn, Yuriy Hnativ, Artur Onyshchenko, Maksym Koval, Oleksii Tiutkin, Mariana Parneta // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – RTU Press, 2021 Volume 16 Issue 2. – pp.90 – 109. ISSN 1822-427X/eISSN 1822-4288.

8. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Klymenko M. I. Analysis of the downstream channel connection of hydraulic structures in transport construction using road culverts under planar conditions. Dorohy i mosty (Roads and Bridges). Kyiv, 2023. Vol. 27. P. 228–244. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.228

9. Tsyvin M. N., Tkachenko N. I. Optimal construction of the downstream channel lining for culverts of estuarine irrigation systems. Hydromelioration and Hydraulic Engineering. Lviv, 1988. Vol. 16. P. 38–43

10. Onyshchenko, A., Ostroverkh B., Potapenko, L., Kovalchuk, V., Zdolnyk, O., & Pentsak, A. (2024). Devising a procedure for integrated modeling of riverbed shape in the area of bridge crossing in order to avoid dangerous washing erosion. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(1 (127), 23–32.https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298675. https://journals.uran.ua/eejet/article/view/298675

Onyshchenko, A., Kovalchuk, V., Voskoboinick, V., Voskobiinyk, A., Aksonov, S., Trudenko, D., & Hrevtsov, S. (2024). Establishing patterns of change in the coefficients of reflection, transmission, and dissipation of wave energy depending on parameters of a permeable vertical wall. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(5 (130), 45–56. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309969 https://journals.uran.ua/eejet/article/view/309969

УДК 624.21
UDC 624.21
DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-184-193

РОЗРАХУНОК НЕУСТАЛЕНОГО РУХУ НА ОСНОВІ ЧИСЛОВОГО МЕТОДУ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ РІВНЯНЬ СЕН-ВЕНАНА

CALCULATION OF UNSTEADY MOTION BASED ON THE NUMERICAL METHOD OF SOLVING SAINT-VENANT EQUATIONS



Паровенко Оксана Микитівна, *кандидат технічних наук, , доцент, доцент кафедри мостів, тунелі та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: olenik.lia@gmail.com,*

https://orcid.org/0000-0001-8872-8415.



Медведєв Костянтин Володимирович, *кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри мостів, тунелі та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: kvmedvediev@gmail.com*

https://orcid.org/0000-0002-0704-7093



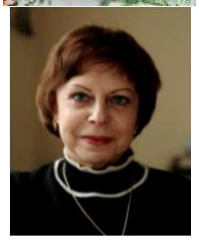
Снитко Валерій Пилипович, *кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри "Мости, тонелі та гідротехнічні споруди", Національний транспортний університет Київ, Україна,,*
e-mail: valeriysnytko49@gmail.com,

https://orcid.org/0009-0003-0325-7899



Корецький Андрій Сергійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,*
e-mail: andriy.koretskyi@ntu.edu.ua,

https://orcid.org/0000-0003-0307-0306



Святишенко Ірина Іванівна*, інженер, Національний транспортний університет, кафедра «Мости, тунелі та гідротехнічні споруди». e-mail: irina.svjatishenko@gmail.com,*

https://orcid.org/0000-0002-8905-0826.

Анотація. У статті розглянуто задачу моделювання неусталеного руху води в руслових системах на основі числового розв'язування рівнянь Сен-Венана, які є фундаментальними у випадку, коли описується динаміка відкритих потоків. Метою роботи є підвищення точності та обчислювальної стійкості прогнозування гідравлічних процесів у природних та штучних руслах за допомогою

удосконаленої числової схеми розрахунку, що поєднує простоту реалізації з гарантованою збіжністю. У дослідженні реалізовано дискретизацію рівнянь неперервності руху з використанням явної різницевої схеми, адаптованої до умов змінної глибини, а також нерівномірного русла та локальних перепадів, які часто виникають у реальних гідравлічних системах. Особливу увагу приділено стабілізації розрахунків із застосуванням умов Куранта та оптимального вибору кроків сітки.

Проведені розрахунки представлено у вигляді порівняння розподілів рівня води та витрати у характерні моменти часу, що дало змогу оцінити динаміку фронту хвилі та підтвердити адекватність математичної моделі. Наведені результати демонструють, що запропонований числовий підхід забезпечує достатню точність навіть за наявності різких змін руслових умов, а отримані профілі глибин та швидкостей добре узгоджуються з аналітичними оцінками та фізичною суттю процесу. Крім того, показано можливість використання розробленої методики для побудови оперативних інженерних прогнозів, зокрема для оцінювання хвиль прориву, паводкових хвиль та інших нестаціонарних гідравлічних явищ.

Результати роботи може бути застосовано для розрахуків гідротехнічних споруд, моделювання паводкових ситуацій, оптимізації водогосподарських систем та у навчальному процесі при викладанні дисциплін з гідравліки та гідрологічного моделювання. Запропонований числовий метод є ефективним інструментом для вирішення широкого спектра практичних задач, пов’язаних з аналізуанням неусталеного руху води, та може бути основою для подальшого удосконалення моделей, включно з урахуванням турбулентності, руслових деформацій і багатовимірних ефектів.

Ключові слова: неусталений рух; рівняння Сен-Венана; числове моделювання; скінченно-різницева схема; метод прогонки; зрошувальні канали; пропускна здатність; гідравлічні розрахунки; попуски через споруди; нестаціонарний потік.

Вступ. Неусталений рух води у відкритих руслах є складним та динамічним гідравлічним процесом, який виникає від дії природних або антропогенних факторів, таких як паводки, аварійні скиди, робота гідротехнічних споруд або прориви водосховищ. Опис та прогнозування таких процесів має важливе практичне значення для забезпечення надійності інфраструктури, мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій, оптимізації роботи гідровузлів та управління водними ресурсами. У сучасній інженерній практиці ключовим математичним інструментом для моделювання неусталених течій є одномірні рівняння Сен-Венана, що представляють собою систему гіперболічних диференціальних рівнянь частинних похідних.

Аналітичне розв’язання рівнянь Сен-Венана можливе лише для окремих спрощених випадків, тому для більшості реальних задач застосовують числові методи. Вибір різницевої схеми, її стійкість, точність та збіжність істотно впливають на достовірність отриманих результатів, особливо за умов різких змін витрати чи глибини, коли у потоці формуються хвилі різного характеру - кінематичні, динамічні або гравітаційні. Тому питання вдосконалення числових алгоритмів і порівняння їхньої ефективності залишаються актуальними для гідравлічних розрахунків.

У цій роботі увагу зосереджено на числовому моделюванні неусталеного потоку на основі рівнянь Сен-Венана з використанням різницевої схеми, що забезпечує достатню точність відтворення хвильових процесів. Проведено аналізування поведінки потоку за імпульсної зміни витрати, визначено характер хвилі, швидкість її поширення та вплив початкових і граничних умов на результати моделювання. Застосована методика дає можливість оцінити придатність вибраного числового підходу для вирішення інженерних задач, пов'язаних із динамікою природних і техногенних водотоків.

Матеріали та методи. У роботі застосовано одномірні рівняння Сен-Венана, які описують неусталений рух води у відкритих руслах і включають рівняння нерозривності та рівняння імпульсу. Для моделювання неусталених процесів використано різницеву схему, побудовану на апроксимації похідних за простором і часом із дотриманням умов стійкості за критерієм Куранта [1, 2, 3, 4]. Швидкість та глибина потоку розраховувалися на кожному часовому кроці відповідно до прийнятого розрахункового алгоритму, що враховує зміну витрати, ухил русла, гідравлічний радіус та сили опору.

Для числового експерименту було задано характерні параметри русла, включно з ухилом, шириною, коефіцієнтом шорсткості, а також початкові та граничні умови, які відтворюють імпульсну зміну витрати верхньої частини розрахункової ділянки. Розрахунки виконувалися з використанням постійного просторового кроку та змінного або сталого часового кроку, що забезпечує збіжність рішення. Результати моделювання представлено у вигляді графіків розвитку хвилі, зміни глибини та витрати в різні моменти часу, що дозволило проаналізувати характер хвильового руху та порівняти його з теоретичними закономірностями.

Методику було реалізовано засобами комп'ютерного моделювання, що дозволило виконати багаторазове повторення розрахунків при різних вхідних параметрах і оцінити чутливість моделі до зміни умов формування неусталеного потоку. Отримані результати дали можливість визначити ефективність застосованого числового методу для інженерних та наукових задач гідравліки.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення та обґрунтування числової методики моделювання неусталеного руху води в відкритих руслах на основі рівнянь Сен-Венана, а також проведення аналізу особливостей формування неусталених хвильових процесів залежно від гідравлічних та геометричних параметрів потоку. Додатковою метою було оцінювання точності та стійкості різницевої схеми, придатності її до практичного застосування в інженерних задачах, зокрема для прогнозування паводків, хвиль прориву та інших динамічних гідравлічних явищ.

Виклад основного матеріалу. Завданням розрахунку неусталеного руху на ділянках зрошувальних каналів, за наявності споруд на них, є визначення основних елементів потоку Q і h залежно від часу та положення створа по довжині русла. Для аналізування впливу досліджуваних чинників на елементи неусталеного потоку, а також для розроблення рекомендацій щодо врахування цих параметрів, було проведено розрахунки на основі числового методу розв'язування рівнянь Сен-Венана.

Результати раніше проведених досліджень дають змогу оцінити ступінь впливу різних чинників на елементи неусталеного потоку. До таких чинників можна віднести форму русла, коефіцієнт шорсткості та ухил дна (ширину і довжину русла, форму та параметри вихідного графіка попуску, швидкість підходу потоку в прикінцевому перерізі) [5, 6] .

Рівняння, що описують неусталений рух, є нелінійними зі змінними коефіцієнтами. Це система диференційних рівнянь у часткових похідних гіперболічного типу. Такі рівняння не мають аналітичної форми розв'язку. Основними методами розв'язання таких рівнянь є числові [7, 8].

Розрахунок неусталеного руху в природних руслах (за достатньої кількості вихідних даних) з найбільшою точністю можна виконати за допомогою метода неявної скінченно-різницевої схеми, використовуючи метод прогонки.

Метод прогонки має стійкий розрахунковий алгоритм, тобто при округленні значень похибка розв'язку не збільшується. Цей метод складається з прямої та зворотньої прогонки.

Пряма прогонка полягає в тому, що ліва гранична умова є початковою і за допомогою скінченно-різницевої схеми отримуємо значення на правій границі, яке порівнюємо з відомими правими граничними умовами. З урахуванням отриманої різниці визначаються нові коефіцієнти для скінченно-різницевої схеми кожної точки всередині області.

Потім процес повторюється в протилежному напрямку - від правої межі до лівої. Визначаються шукані величини Q і h у кожній точці всередині та на лівій границі області за знайденими під час прямої прогонки прогоночними коефіцієнтами, та за визначеними значеннями шуканих величин на правій границі.

Стійкість розрахунку є визначальною при проведенні розрахунку неусталеного руху за неявною скінченно-різницевою схемою методом прогонки. Скінченно-різницева схема називається стійкою, якщо малі похибки, допущені в процесі розв'язування, загасають або залишаються малими при необмеженому збільшенні номера поточного шару. Необхідною умовою стійкості обчислювального процесу є умова, яку представлено у вигляді:

$$\tau < \frac{c}{g\sqrt{\frac{R}{I}}}, \quad (1)$$

де τ - крок за часом;
R - гідравлічний радіус;
I - гідравлічний ухил;
c – швидкість розповсюдження малих збуджень;
g – прискорення вільного падіння.

У розрахунках, проведених раніше [3, 4], було враховано крок за часом, який приймався в досить широкому діапазоні 0,001 ÷ 120 сек. У подальшому при проведенні розрахунків його величину було прийнято у вигляді:

$$\tau = \frac{Q}{g\omega I}, \quad (2)$$

де ω - площа живого перерізу;
Q – витрата рідини;
I – гідравлічний ухил дна русла.

Як видно з проведених розрахунків прийнята величина кроку за часом дала необхідну стійкість обчисленням.

Необхідно також звернути увагу на існування залежності між кроком за часом τ і кроком за довжиною русла Δ, тому що точність розрахунку залежить від відношення Δ/τ. Правильний вибір величини кроку по довжині русла значно впливає на загальний результат і точність розрахунку. Проведений аналіз показав, що збільшення кроку по довжині русла призводить до появи пилкоподібних коливань значень витрат і глибин (Q і h), при цьому відзначається, що діапазон коливань для витрат збільшується, а для глибин зменшується. З огляду на вищенаведене, взаємозв'язок кроку за часом τ і кроку за довжиною Δ має бути в межах Δ/τ = 1÷3.

Як початкові умови було задано рівень води та розподіл витрати по довжині русла на певний момент часу, який було прийнято за початковий період. При цьому для умов неусталеного руху води в зрошувальних каналах прийнято, що в початковий момент часу рух у руслі був сталим і рівномірним. Необхідно відмітити, що залежно від призначення каналу величина початкової глибини буде змінюватися. У зв'язку з цим для кожного нового значення початкової глибини слід визначати величину кроку за часом, а отже, і величину кроку по довжині. Значення Δ і τ, прийняті в розрахунках, наведено в таблиці 1.

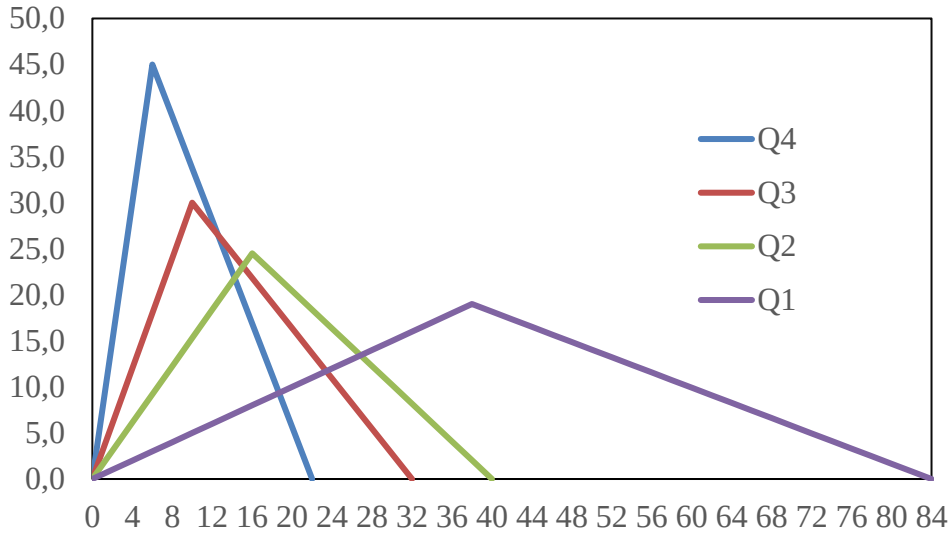
Таблиця 1 – Значення Δ і τ залежно від початкової глибини h_0
Table 1 – Values of Δ and τ depending on the initial depth h_0

	Початкова глибина, h_0			
	0,1 м	0,5 м	1,0 м	2,0 м
τ, хв.	30	60	120	200
Δ, м	50	100	200	200

Необхідною умовою для розв'язання рівнянь неусталеного руху є визначення початкових умов, тобто слід задати положення рівня води та розподіл витрати по довжині русла на момент часу, який прийнято за початковий. Досвід експлуатування каналів показує, що початкові умови характеризуються відсутністю руху води (горизонтальна поверхня) або частіше наявністю рівномірного руху. Отже, параметри, що характеризують початкові умови, мають бути відомими та залежними від призначення каналу.

Під час складання алгоритму для розв'язання поставленої задачі необхідно вирішити питання про вибір форм графіків попусків, які відповідали б найбільш характерним режимам роботи перегороджувальної споруди. Залежно від конструкції цієї споруди визначається умова на лівій межі розглянутої ділянки русла.

а



б

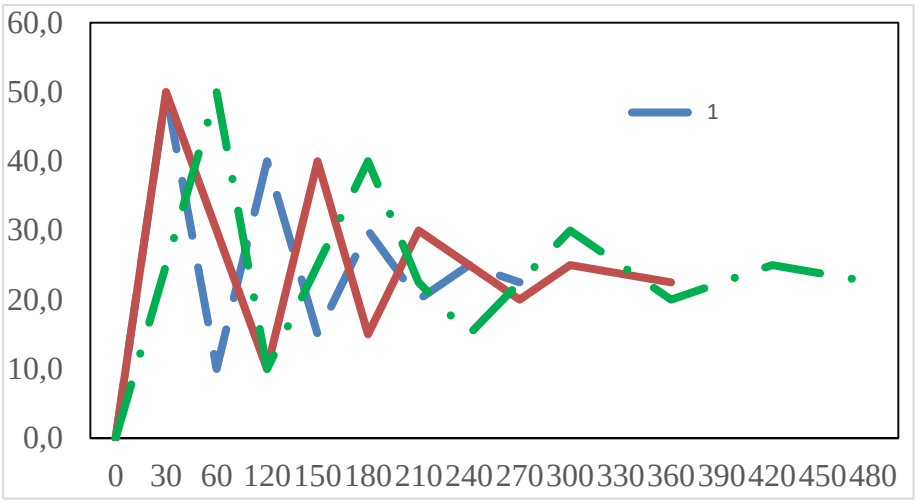


Рисунок 1 – Форми графіків попусків: *а* – гідрограф трикутної форми;……
б – багатоінтервальний гідрограф
Figure 1 – Forms of discharge graphs: a – triangular hydrograph;
b – multi-interval hydrograph

Натурні спостереження дали змогу чітко вирішити питання вибору форм графіків попусків для лівої граничної умови. Тобто витрата в перегороджувальній споруді на лівій межі залежить від часу $Q=f(t)$. Побудовані графіки роботи таких споруд показали, що залежність $Q=f(t)$ мають складну форму. Проведення більш детального аналізу показало, що форма отриманих графіків поодиноких попусків, близька до трикутної або трапеціїдальної. У подальшому було показано, що можливе спрощення складних за обрисом графіків попусків у простіші - трикутні. Таке спрощення не дає великих розбіжностей у результатах розрахунків. В основних розрахунках було використано трикутну форму

графіків попусків. Слід зазначити, що прийняття трикутної форми графіка попуску як лівої граничної умови, дає змогу проводити розрахунки для найневигідніших режимів експлуатування каналу. Трикутна форма графіка попуску сприяє різкому збільшенню та зменшенню витрати, і за такої форми графіку попуску жодного згладжувального ефекту не буде. У випадку трикутної форми графіку елементи $Q=f(t)$ досягають *max* і *min* протягом короткого проміжку часу. Таке різке коливання може бути причиною виникнення негативних явищ у руслі каналу.

Станом на сьогодні існує багато різних схем регулювання подачі води. За таких умов попуск води в каналах проводиться за багатоінтервальним графіком, що пов'язано з питанням поліпшення експлуатування мережі зрошувальних каналів. Багатоінтервальні графіки попуску забезпечують не лише нормальний режим роботи каналу, а й роботу всіх споруд в аварійних ситуаціях.

Проведені дослідження показують, що багатоінтервальні графіки попуску є оптимальними для непродуктивних скидів води. Подібного роду попуски забезпечують перехід у стаціонарний режим за мінімально короткий проміжок часу. На рисунку 1 наведено прийняті в розрахунках форми графіків попусків. Залежність витрати від часу для будь-якої форми графіка попусків (рисунок 2) представлено у вигляді:

$$Q_t = Q_i + (Q_{i+1} + Q_i)\frac{t - t_1}{\Delta t_{i+1}}, \tag{3}$$

де Q_t - величина витрати на будь-який момент часу t;

Q_i - величина витрати на кінець інтервалу i ;

Q_{i+1} - величина витрати на кінці інтервалу i+1;

t_i - час у хвилинах від початку гідрографа до інтервалу i+1 ;

Δt_{i+1}- час у хвилинах, інтервалу i+1.

Аналізування наявних методів визначення пропускної спроможності малих гідротехнічних споруд дає змогу застосувати вищенаведені рекомендації до формули, що визначає пропускну спроможність споруди, розташованої наприкінці ділянки русла, та застосувати залежність, яка визначає умову на правій границі.

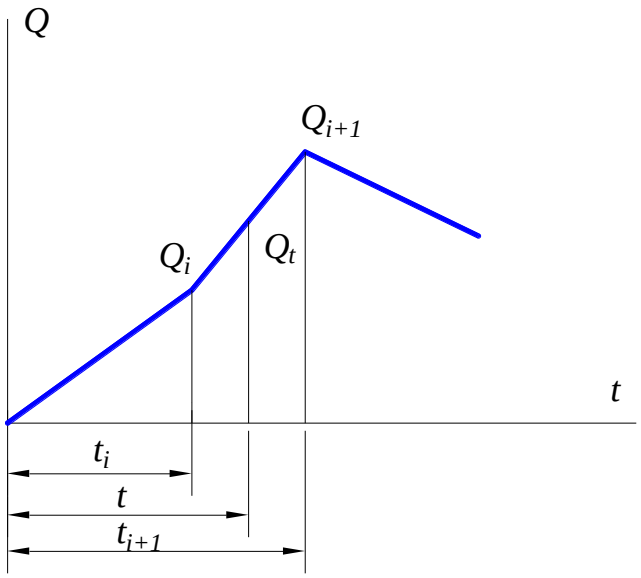


Рисунок 2 – Залежність витрати від часу для будь-якої форми графіка попусків
Figure 2 – Dependence of consumption on time for any shape of the graph of allowances

На правій границі було розглянуто дві форми поперечних перерізів каналів (прямокутний і трапецеїдальний) і дві форми підмостових перерізів (прямокутний і трапецеїдальний). У випадку, коли підмостовий переріз має прямокутну форму, витрата визначалась за формулою:

$$Q = m\sigma_3 kb\sqrt{2g}H_0^{3/2}. \quad (4)$$

Позначимо $F = m\sigma_3 kb\sqrt{2g}$,

тоді, $Q = FH_0^{3/2}$,

де m - коефіцієнт витрати;

σ_3 - коефіцієнт затоплення;

k - коефіцієнт бічного стиснення, що залежить від відношення b/B і типу вхідної грані;

b - ширина підмостового перерізу;

H_0 - гідродинамічний напір перед спорудою.

Для випадку трапецеїдальної форми поперечного перерізу підмостового русла витрата визначалась за формулою:

$$Q = m\sigma_3 k\left(b + m_{cn}0{,}8H_0\right)\sqrt{2g}H_0^{3/2}. \quad (5)$$

Звідси

$$\frac{dQ}{dh} = 1{,}5FH_0^{3/2}. \quad (6)$$

У разі, якщо русло та підмостовий переріз мають трапецеїдальну форму, то пропускна здатність споруди визначається за формулою:

$$\frac{dQ}{dh} = \frac{3}{2}H_0^{1/2}Fb_{cn} + \frac{5}{2}H_0^{3/2}F0{,}8m_{cn} = 1{,}5H_0^{3/2}Fb_{cn} + 2{,}5H_0^{3/2}F0{,}8m_{cn} = F\left(1{,}5H_0^{3/2}b_{cn} + 2H_0^{3/2}m_{cn}\right). \quad (7)$$

Для розв'язання практичних завдань, пов'язаних з експлуатуванням різних видів зрошувальних каналів і роботи гідротехнічних споруд, необхідне проведення розрахунків, які дали б змогу врахувати вплив початкової глибини наповнення на розпластуваність потоку.

Обстеження гідротехнічних споруд показало, що вони можуть перебувати на різній відстані від перегороджувальної споруди. Проведені раніше дослідження [3, 4] дали змогу встановити вплив довжини русла (відстань, на якій розташована гідротехнічна споруда, від перегороджувальної споруди) на характеристики неусталеного руху. У цих дослідженнях використано параметри, які лише часткою параметрів, що характеризують зрошувальні канали. В результатах наступного етапу числового експерименту дослідження було враховано вплив відстані, на якій розташовано споруду від початкового перерізу, на характеристики неусталеного потоку. Перегороджувальна споруда приймалась як початковий переріз, який визначав умову на лівій границі ділянки русла.

Гідротехнічна споруда, зазвичай, обмежує потік води в плані, тобто отвір споруди приймається меншим ніж ширина потоку, що в свою чергу викликає підвищення рівня води у верхньому б'єфі, тобто перед спорудою. Але ступінь стиснення каналу спорудою може бути різним, тому постає питання про необхідність визначення, як ступінь стиснення впливає на елементи потоку при нестаціонарному русі води. Вирішення наведеної проблеми дасть змогу відповісти ще на одне з важливих питань - чи забезпечить наявна споруда без її реконструювання пропуск необхідних витрат води за допустимих рівнів після розширення каналу. З метою отримання більш достовірних результатів при проведенні числового експерименту вихідні дані приймались відповідно до реальних умов. Натурні спостереження роботи перегороджувальних споруд на зрошувальних каналах сприяють правильному вибору параметрів графіків попусків. Значення коефіцієнта шорсткості та ухилу дна каналу мають прийматись на підставі натурних спостережень.

Натурні спостереження підтвердили проведені раніше теоретичні розрахунки щодо визначення впливу різних чинників на характеристики неусталеного потоку. Аналізування робіт [3, 4] показало, що прийнята методика проведення числового експерименту не дала істотних розбіжностей з дослідними даними та результатами натурних спостережень (5%).

Сучасні вимоги стану експлуатування зрошувальних каналів зумовлюють необхідність переходу на автоматичний режим регулювання подачі води в них через перегороджувальну споруду.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило ефективність застосування числового методу розв'язування рівнянь Сен-Венана для моделювання неусталеного руху води в руслах зі складними умовами течії. Використана різницева схема показала високу стійкість та збіжність розрахунків за умови дотримання критерію Куранта та відповідного вибору просторово-часових кроків. Отримані результати моделювання відтворюють характерні особливості динаміки хвильового руху, зокрема формування та поширення фронту хвилі, зміни глибин та швидкостей у часі, що підтверджує адекватність і фізичну достовірність розрахункової моделі. Порівняння профілів витрати та рівнів у різні моменти часу демонструє узгодженість числових даних із відомими теоретичними закономірностями, що свідчить про придатність обраного підходу для інженерних задач.

Розроблена методика може бути використана для прогнозування паводкових явищ, визначення хвиль прориву, аналізу роботи водогосподарських та гідротехнічних споруд, а також для навчальних цілей у курсах, присвячених моделюванню течій відкритих каналів. Запропонований підхід є гнучким і може бути розширений шляхом включення додаткових фізичних факторів, таких як турбулентність, руслові деформації або тривимірні ефекти течії. Таким чином, виконана робота робить внесок у розвиток сучасних методів числового моделювання неусталених потоків і створює підґрунтя для подальших досліджень у сфері гідравліки та гідрологічної безпеки.

Перелік посилань

1 ДСТУ Б В.2.4-1-99. Гідротехнічні споруди. Основні положення розрахунку водного потоку.

2 Баб'як М. В., Левківський О. М., Никифорчук О. М. Гідравліка: підручник. — Львів: Львівська політехніка, 2017. — 420 с.3 Постанова Кабінету Міністрів України "Про затвердження порядку відновлення зруйнованої інфраструктури" (умовний документ).

3 Паровенко О.М., Медведєв К.В., Євсейчик Ю.Б., Корецький А.С., Снитко В.П., Святишенко І.І. Теоретичні основи розрахунку неусталеного руху рідини. /Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2024, вип.115. Частина 2 – с.233-244.

4 Паровенко О.М., Снитко В.П., Корецький А.С., Рубльов А.В. Дослідження неусталеного руху рідини відкритих русел. /Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2024, вип.115. Частина 1 – с.89-98. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-089-098

5 Горбенко В. М. Гідравліка, гідрологія і гідрометрія: навч. посібник. — Київ: КНУБА, 2015. — 368 с.5 International Guidelines for Post-Conflict Infrastructure Reconstruction. (2023). United Nations Development Programme (UNDP). (Приклад міжнародного звіту).

6 Косовський П. Ф., Трохимчук В. М. Гідравліка відкритих русел. — Київ: КНУБА, 2012. — 285 с.

7 Саблій Л. І. Математичне моделювання процесів у гідротехнічних системах. — Харків: ХНУБА, 2019.

8 Никифоров М. Б. Чисельні методи в інженерній практиці: навчальний посібник. — Київ: НАУ, 2018.

CALCULATION OF UNSTEADY MOTION BASED ON THE NUMERICAL METHOD OF SOLVING SAINT-VENANT EQUATIONS

Parovenko Oksana M., Candidate of Technical Science, National Transport University, Department of Bridges and tunnels, hydraulic structures, Associate Professor, e-mail:olen[k.lia@gmail.com +380442807978, https://orcid.org/0000-0001-8872-8415.

Medvediev Kostiantyn V., Candidate of Physics and Mathematics, National Transport University, Department of Bridges and tunnels, hydraulic structures, Professor, e-mail: kvmedvediev@gmail.com, +380442807978, https://orcid.org/0000-0002-0704-7093.

Snytko Valerii P., Candidate of Technical Science, Associate Professor, National Transport University, Department of Bridges, tunnels and hydraulic structures, Professor, e-mail: valeriysnytko@ukr.net, тел. +380442807978, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1. https://orcid.org/0000-0002-9530-4589

Koretsky Andrii S., Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: andriy.koretskyi@ntu.edu.ua tel..+3800505433772, https://orcid.org/0000-0003-0307-0306

Sviatyshenko Iryna I., National Transport University, Department of Bridges and tunnels, hydraulic structures, Engineer, e-mail irina.svjatishenko@gmail.com +380442807978, https://orcid.org/0000-0002-8905-0826

Summary. The article considers the problem of modeling unsteady water flow in channel systems based on the numerical solution of Saint-Venant equations, which are fundamental in describing the dynamics of open flows. The aim of the work is to improve the accuracy and computational stability of forecasting hydraulic processes in natural and artificial channels using an improved numerical calculation scheme that combines simplicity of implementation with guaranteed convergence. The study implements the discretization of continuity equations using an explicit difference scheme adapted to variable depth conditions, as well as uneven channels and local drops, which often occur in real hydraulic systems. Particular attention is paid to the stabilization of calculations using Courant conditions and the optimal selection of grid steps.

The calculations are presented in the form of a comparison of water level and flow distributions at characteristic moments in time, which made it possible to evaluate the dynamics of the wave front and confirm the adequacy of the mathematical model. The results show that the proposed numerical approach provides sufficient accuracy even in the presence of sharp changes in channel conditions, and the obtained depth and velocity profiles are well consistent with analytical estimates and the physical essence of the process. In addition, the possibility of using the developed methodology for constructing operational engineering forecasts, in particular for assessing breakthrough waves, flood waves, and other non-stationary hydraulic phenomena, is shown.

The results of the work can be used for the calculation of hydraulic structures, modeling of flood situations, optimization of water management systems, and in the educational process when teaching disciplines in hydraulics and hydrological modeling. The proposed numerical method is an effective tool for solving a wide range of practical problems related to the analysis of unsteady water flow and can be the basis for further improvement of models, including taking into account turbulence, channel deformations, and multidimensional effects.

Keywords: unstable flow; Saint-Venant equation; numerical modeling; finite difference scheme; run-in method; irrigation channels; flow capacity; hydraulic calculations; discharge through structures; unsteady flow.

References

1 DBN V.2.3-14:2006. Transport structures. Bridges and pipes. Design standards. (or the current version of DBN, if there is a newer one). Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine.

2 Law of Ukraine “On the Restoration and Development of Infrastructure” (or a similar document, if such a law exists or is planned).

3 Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine “On Approval of the Procedure for the Restoration of Destroyed Infrastructure” (conditional document).

4 Kovalenko, V. A., & Smirnov, P. G. (2020). Quick-assembly bridge structures in emergency situations. Scientific Bulletin of Construction, 2(3), 45-52.

5 International Guidelines for Post-Conflict Infrastructure Reconstruction. (2023). United Nations Development Programme (UNDP).

6 Grygorenko, M. V., & Petrenko, O. S. (2018). Bridge crossings: design and construction. Kyiv: Osnova.

7 Mabey Bridge Official Website. (URL: www.mabeybridge.com). Section on modular and quick-assembly bridges.

8 Materials from the conference “Rebuilding Ukraine: Engineering Solutions and Challenges in Wartime.” (2024). Collection of scientific papers.

УДК 624.21
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-194-202

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРАВЛІЧНИХ ФАКТОРІВ ПРИ РОЗРАХУНКУ МАЛИХ МОСТІВ З УРАХУВАННЯМ АККУМУЛЯЦІЇ

STUDY OF THE INFLUENCE OF HYDRAULIC FACTORS IN THE DESIGN OF SMALL BRIDGES TAKING INTO ACCOUNT ACCUMULATION



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: У роботі розглянуто вплив акумуляції води перед малими гідротехнічними спорудами, зокрема мостами, на гідравлічний режим потоку під час паводків. Встановлено, що за умови недостатньої ширини отвору споруди утворюється підпір, а частина води затримується перед насипом дороги, що змінює форму гідрографа витрати. Акумуляція води має суттєвий вплив на величину скидної витрати, особливо при короткотривалих паводках. Врахування цього явища дозволяє оптимізувати габарити споруди, зменшити її отвір або висоту насипу. Історично цей підхід не застосовувався через нестачу вихідних гідрографічних даних, проте сучасні нормативи й методи розрахунку забезпечують можливість урахування акумуляції за допомогою простих інженерних рішень.

Ключові слова: штучні споруди, акумуляція, гідрограф, об'ємом стоку, величина скидної витрати, форми лога.

Вступ. У проектуванні малих гідротехнічних споруд, зокрема мостових переходів, важливим є точне визначення гідравлічних характеристик потоку під час паводків. Особливу увагу слід приділяти явищу акумуляції води перед спорудою, що виникає внаслідок невідповідності ширини отвору споруди ширині потоку. За таких умов відбувається підпір, зростає швидкість течії в отворі, а частина припливної води тимчасово затримується перед насипом дороги.

Це явище суттєво впливає на формування гідрографа витрати в розрахунковому створі, зумовлюючи зміну як максимальної витрати, так і глибини потоку. Акумуляція води особливо важлива при короткотривалих паводках, коли її врахування дозволяє оптимізувати конструкцію споруди — зменшити розміри отвору або знизити висоту насипу без втрати пропускної здатності.
Дослідження, викладене в даній роботі, спрямоване на аналіз впливу акумуляції на гідравлічний режим малих мостів та обґрунтування підходів до врахування цього ефекту в інженерних розрахунках.

Виклад основного матеріалу. Отвіри малих штучних споруд зазвичай менший за ширину потоку (при розрахунковій витраті) що впливає на зменшення живого перерізу. В результаті цього частина протікаючої води з басейну тимчасово затримується перед штучною спорудою, утворюючи певний об'єм акумуляції ($W_{\text{ак}}$), який в окремих випадках може становити вагому частку загального об'єму стоку W.

Ступінь накопичення, відображена відношенням $\frac{W_{\text{ак}}}{W}$, визначає розміри акумуляції що відповідають розрахунковому об'єму скидної витрати $Q_{\text{ск}}$ (тобто об'єму, який фактично проходить через отвір малого мосту при розрахунковому напорі води H). Відповідно, що чим більше відношення $\frac{W_{\text{ак}}}{W}$, тобто чим більше накопичиться води перед штучною спорудою, тим менша величина скидної витрати, і навпаки, при зменшенні об'єму накопичення $Q_{\text{ск}}$ наближається за своєю величиною до максимальної витрати притоку води Q_{max} .

За умов значного об'єму акумуляції в заданій гідрологічній ситуації, розрахунково несприятливішим може виявитися не гідрограф з максимальною витратою, а той, що характеризується більшим загальним об'ємом стоку при нижчій інтенсивності витрати. [1]

Таку перевірку зазвичай проводять не для кожного гідрографа з серії з однаковою ймовірністю реалізації кожного гідрографа, а приймають до розрахунку беруть лише гідрограф з максимальним об'ємом стоку.

Таким чином, врахування акумуляції води (тобто накопиченої води перед малим мостом для забезпечення розрахункового напору H) дозволяє зменшити розміри споруди (при тому ж самому напорі H) або знизити напір H перед мостом (при тому ж отворі). Максимальний ефект від урахування акумуляції спостерігається для споруд, розташованих у рівнинних або слабо пересічених районах.

При виконанні практичних розрахунків ступінь накопичення регулюється, виходячи з інженерно-технічних міркувань залежно від допустимої глибини підтоплення кромки насипу підходів або місцевості біля споруди, а також узгоджується з розміром отвору і допустимою швидкістю на виході зі штучної споруди.

Відповідно до нормативних вказівок (ВСН 63-67) розрахунок отворів малих мостів на витрати зливового стоку у всіх випадках проводиться з урахуванням акумуляції, а зменшення розрахункової витрати припливу води за рахунок акумуляції допускається не більше ніж на 67 %.

Розрахунок отворів малих мостів [2] на витрати зливового стоку у всіх випадках проводиться з урахуванням акумуляції, а зменшення розрахункового витрати притоку води за рахунок акумуляції допускається не більше ніж на 67%.

Розрахунки з урахуванням акумуляції базуються на розв'язанні диференціального рівняння водного балансу

$$\Omega \ \mathrm{d}H = Q\,\mathrm{d}t - Q_{\text{ск}}\,\mathrm{d}t, \tag{1}$$

Де Ω- площа дзеркала ставка, утвореного накопиченою водою перед спорудою;
dH - зміна рівня води у ставку;
Q - витрата зливового стоку, що відповідає зміні гідрографа;
$Q_{\text{сб}}$ - скидна витрата, визначена пропускною здатністю споруди при даному напорі;
dt - розглянутий проміжок часу.

За методом розв'язання рівняння (1) всі підходи розрахунку з урахуванням акумуляції можна поділити на аналітичні, графоаналітичні та чисельні (табличні). Найчастіше у практичних розрахунках застосовуються аналітичні та графоаналітичні методи.

Розглянемо розрахунок отвору мосту за методом Ю. М. Даденкова рекомендується виконувати у такій послідовності.

Спочатку необхідно визначити обсяг ставка перед насипом при глибині Нр, для чого підраховують коефіцієнт форми лога [4]

$$k = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{i_1} + \frac{1}{i_2}\right)\frac{1}{i_л} \tag{2}$$

де k - коефіцієнт форми лога;
i_1 та i_2 - ухили схилів лога;
$i_л$ – схил лога;

Об'єм води $W_{\text{пр}}$ може бути визначений за планом місцевості в горизонталях перед спорудженням. Потім визначають допоміжну величину $l = \frac{2W_{np}}{W}$ і за даними табл. 1 встановлюють іншу допоміжну величину, відповідну вичисленому значенню l.

Далі рахують час зростання витрат припливу $T_1 = \frac{W}{Q_Л}$, що робить можливість визначити ширину отвору моста з урахуванням акамуляції за формулою

$$b_{ek} = \frac{1}{m\sqrt{2\mathrm{g}}}\sqrt{\frac{2kQ_л}{3\mathrm{a}_0 T_1}} \tag{3}$$

Округливши значення до найближчого стандартного значення обчислюють уточнену допоміжну величину

$$a_0 = \frac{kQ_л}{1{,}5\ m^2 2g b_1^2 T_1} \tag{4}$$

Для полегшення розрахунків використаємо табл. 1 допоміжних величин a_0 φ та l . Послідовність розрахунку отвору малого моста з урахуванням акумуляції за способом Ю.М. Даденкова наступна.

Таблиця 1 **-** допоміжних величин
Table 1 **-** Auxiliary values

a_0	φ	l	a_0	φ	l	a_0	φ	l
0	1	0	2,0	0,58	0,68	5,8	0,42	1,03
0,1	0,93	0,09	2,2	0,57	0,71	6,0	0,41	1,05
0,2	0,89	0,16	2,4	0,56	0,74	6,5	0,40	1,07
0,3	0,85	0,21	2,6	0,54	0,77	7,0	0,39	1,10
0,4	0,81	0,26	2,8	0,53	0,79	8,0	0,38	1,14
0,5	0,79	0,31	3,0	0,52	0,81	9,0	0,36	1,17
0,6	0,76	0,35	3,2	0,51	0,83	10	0,35	1,21
0,7	0,74	0,39	3,4	0,50	0,85	12	0,33	1,27
0,8	0,73	0,42	3,6	0,49	0,87	14	0,31	1,31
0,9	0,71	0,45	3,8	0,48	0,89	16	0,29	1,35
1,0	0,69	0,48	4,0	0,48	0,91	18	0,28	1,39
1,1	0,68	0,50	4,2	0,47	0,92	20	0,27	1,43
1,2	0,66	0,52	4,4	0,46	0,94	25	0,24	1,47
1,3	0,65	0,55	4,6	0,46	0,95	30	0,23	1,54
1,4	0,64	0,57	4,8	0,45	0,97	35	0,21	1,58
1,5	0,63	0,60	5,0	0,44	0,98	40	0,20	1,60
1,6	0,62	0,62	5,2	0,43	0,99	50	0,18	1,67
1,7	0,61	0,64	5,4	0,43	1,00	100	0,13	1,76
1,8	0,60	0,65	5,6	0,42	1,01	-	0	2,00
1,9	0,59	0,67						

А потім по таблиці 1 знаходять коефіцієнт акумуляції що дозволяє встановити потрібну величину скидного витрати [5]

$$Q_{c\delta} = \varphi_1 Q_л \tag{5}$$

На закінчення обчислюють дійсний натиск перед спорудженням [6]

$$Hp = \sqrt[3]{\left(\frac{Q_{ск}}{m\sqrt{2gb}}\right)^2} \tag{6}$$

Проведемо дослідження зміни отвору малого мосту з урахуванням акумуляції при нахилі лога $i_л$ від 0,001 до 0,1, середні похили схилів $i_1 = i_2 = 0{,}01$, допустимий напір перед насипом $H_р = 2{,}0$ м, ширина розриву ставка $B = 370$ м, максимальний розхід зливових вод $Q = 15{,}5$ м\сек^3, повний об'єм стоку $W = 180$ тис\м^3 .

Результати розрахунків по вище наведених формулах занесемо в таблицю 2.

Таблиця 2 –Зміна отвору розміру малого моста від схилу лога
Table 2 – Change in the opening size of the small bridge from the slope of the ravine

Схил лога ‰	0,001	0,003	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,05	0,1
Отвір мосту м	5,26	3,03	2,35	1,66	1,36	1,18	1,05	0,74	0,53

Для зручності сприйняття даних показників побудуємо діаграму.

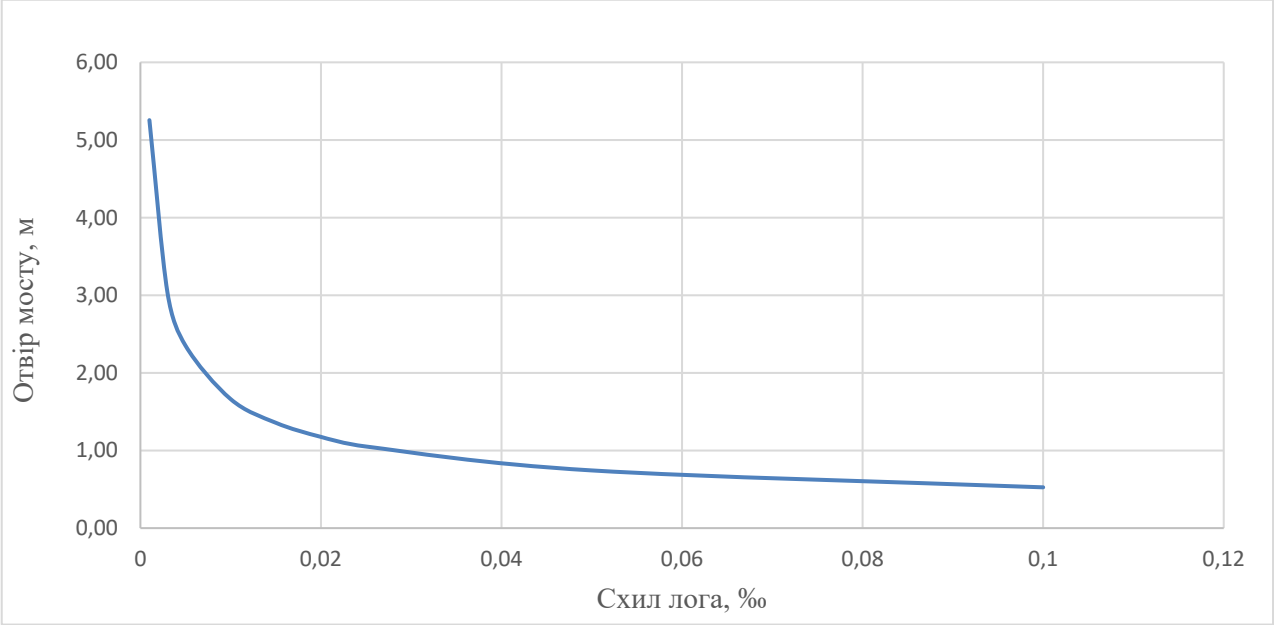


Рисунок 1 – залежність зміни отвору мосту від схилу лога
Figure 1 – Dependence of bridge span variation on slope gradient

Виходячи з виконаних розрахунків та побудованого графіка рис. 1 розмір отвору малого моста зменшується від збільшення схилу лога.

Проведемо дослідження зміни отвору малого мосту з урахуванням акумуляції, нахилі лога $i_л$ від 0,005, середні похили схилів $i_1 = i_2 = 0{,}01$, допустимий напір перед насипом $H_р = 2{,}0$ м, ширина розриву ставка $B = 370$ м, максимальний розхід зливових вод $Q =$ від1 до 100 м\сек^3, повний об'єм стоку $W = 180$ тис\м^3 . [7]

Результати розрахунків по вище наведених формулах занесемо в таблицю 3.

Таблиця 3 –Зміна отвору розміру малого моста від максимального розходу ливньових вод
Table 3 – Change in the opening size of the small bridge from the maximum storm water discharge

Макс. розхід ливньових вод м/сек3	1	3	5	10	15	20	25	50	100
Отвір мосту м	0,60	1,03	1,33	1,89	2,31	2,67	2,98	4,22	5,97

Для зручності сприйняття даних показників побудуємо діаграму.

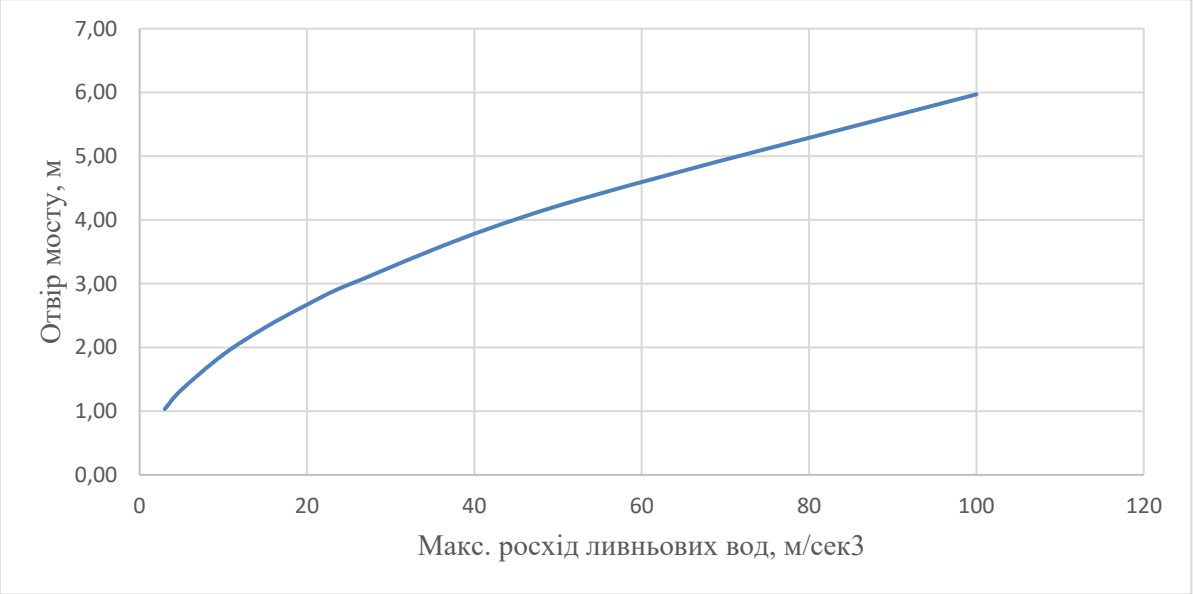


Рисунок 2 – Залежність зміни отвору мосту від максимального розходу ливньових вод
Figure 2 – Dependence of bridge opening change on maximum storm water discharge

Виходячи з виконаних розрахунків та побудованого графіка рис. 2 розмір отвору малого моста збільшується від збільшення максимального розходу ливньових вод.

Проведемо дослідження зміни отвору малого мосту з урахуванням акумуляції, нахилі лога $i_л$ від 0,005, середні похили схилів $i_1 = i_2 = 0{,}01$, допустимий напір перед насипом $H_р = 2{,}0$ м, ширина розриву ставка $B = 370$ м, максимальний розхід зливових вод $Q = 15{,}5$ м\сек^3 , повний об'єм стоку $W =$ від 10 до 400 тис\м^3 .

Результати розрахунків по вище наведених формулах занесемо в таблицю 4.

Таблиця 4 –Зміна отвору розміру малого моста від об'єму стоку
Table 4 – Change in the opening size of the small bridge from the volume of runoff

Повний об'єм стока м3	10 000,00	50 000,00	100 000,00	150 000,00	200 000,00	250 000,00	300 000,00	350 000,00	400 000,00
Отвір мосту м	9,97	4,46	3,15	2,57	2,23	1,99	1,82	1,69	1,58

Для зручності сприйняття даних показників побудуємо діаграму.

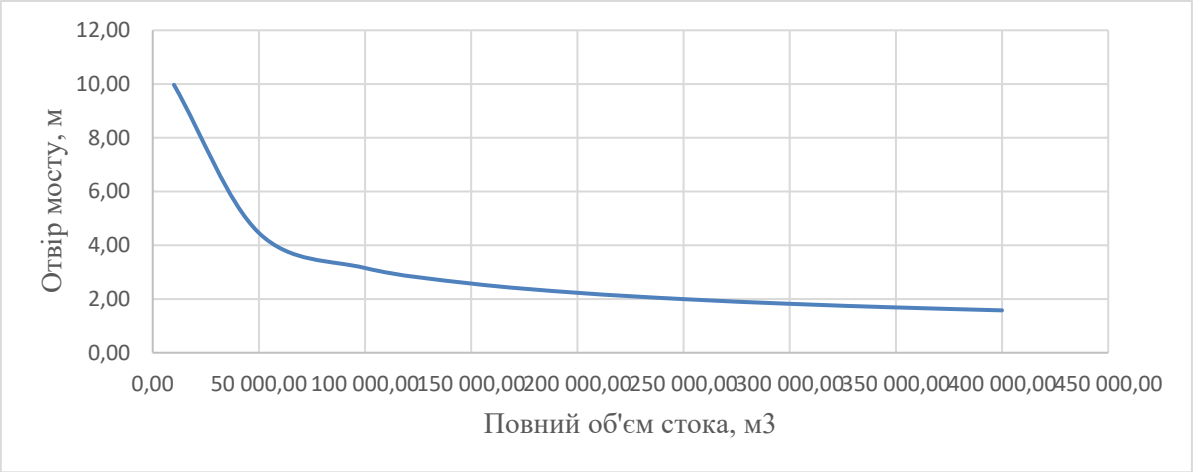


Рисунок 3 – Залежність зміни отвору мосту від об’єму стоку
Figure 3 – Dependence of bridge opening change on flow volume

Виходячи з виконаних розрахунків та побудованого графіка рис. 3 розмір отвору малого моста зменшується від збільшення повного об’єму стоку.

Висновки. У стисненому стані величина витрати, що проходить через розрахунковий створ, і відповідно глибина потоку наростає від нуля до максимального значення. Потім витрата та глибина поступово спадають знову до нуля.

Отвір штучної споруди менший за ширину потоку, що веде до утворення підпору перед спорудою, а в самій споруді зростає швидкість течії. Таким чином, при пропуску паводків малими мостами частина води, що притікає, затримується перед земляним полотном автомобільної дороги. У ряді випадків обсяг тимчасово накопиченої води перед спорудою становить значну частину паводку, що може призвести до зменшення скидної витрати в отворі споруди порівняно з найбільшою витратою припливу води до мосту. Фактично явище акумуляції спостерігається завжди. Проте за великої тривалості паводку це впливає на величину скидної витрати.[8]

Облік акумуляції перед спорудженням при коротких паводках дає змогу зменшити розміри отвору споруди або знизити висоту насипу.

Ідея обліку акумуляції не використовувалася в практичних розрахунках через відсутність даних для побудови розрахункових гідрографів стоку, тобто припливу води до споруд. Роботи ряду дослідників (Д. І. Кочеріна, Ю. М. Даденкова, О. О. Рассказова) та вдосконалення норм стоку, які тепер дають можливість визначати не тільки максимальну витрату, а й об'єм притоку води до дороги, дозволяють у даний час проводити облік акумуляції води перед спорудою при коротких паводках шляхом застосування простих та зручних прийомів розрахунку.

Перелік посилань

1. Большаков В.О., Курганович О.О. Гідрологічні та гідравлічні розрахунки. Київ: 1983. 197-200с.

2. Даденков Ю.М. Гідравлічний розрахунок отворів малих мостів з урахуванням накопичення води перед спорудою. Праці Київського автомобільного дорожнього інституту. – М-во культури СРСР, Управління будівельних вузів. Київ: 1953. - 65-83с.

3. Курганович О.О., Лютик П.М. Гідрологічне обґрунтування проектування мостових переходів: навчальний посібник. Київ: КАДІ, 1977. - 130 с.

4. Большаков В.О., Курганович О.О. Розрахунок стоку та отворів малих мостів та гофрованих труб. Київ: 1966. 85-89с.

5. Большаков В.О. Збірник завдань з гідравліки. Київ 1979. 193-200с.

6. Хом'як Я. В. Гідравлічні розрахунки малих мостів і дорожніх труб. Київ. автомобільно-дорожній інститут, кафедра проектування доріг. 1961. 92 с.

7. Даденков Ю.М. Дослідження пропускання дощових вод малими мостами автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Київський політехнічний інститут. – Київ: 1952 - 26 с.

8. Даденков Ю.М. Встановлення графіків припливу води до споруди за даними спостережень за пропуском дощових вод малими мостами. Праці Київського автомобільного дорожнього інституту. – М-во культури СРСР, Головне управління гірничо-металургійних і будівельних вузів. Київ: 1955. Зб. 2. 116-118с.

STUDY OF THE INFLUENCE OF HYDRAULIC FACTORS IN THE DESIGN OF SMALL BRIDGES TAKING INTO ACCOUNT ACCUMULATION

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. In a compressed state, the flow rate passing through the calculated section and, accordingly, the depth of the flow increases from zero to the maximum value. Then the flow rate and depth gradually decrease back to zero.

The opening of the artificial structure is smaller than the width of the flow, which leads to the formation of a backwater in front of the structure, and the flow velocity increases in the structure itself. Thus, when floods pass through small bridges, part of the inflowing water is retained in front of the earthen roadbed. In some cases, the volume of water temporarily accumulated in front of the structure constitutes a significant part of the flood, which can lead to a decrease in the discharge through the structure's opening compared to the maximum inflow to the bridge. In fact, the phenomenon of accumulation is always observed. However, during prolonged floods, this affects the discharge rate.

Accounting for accumulation before construction during short floods makes it possible to reduce the size of the structure's opening or lower the height of the embankment.

The idea of accounting for accumulation was not used in practical calculations due to the lack of data for constructing calculated hydrographs of runoff, i.e., water inflow to structures. The work of a number of researchers (D. I. Kocherina, Yu. N. Dadenkov, O. A. Rasskazov) and the improvement of runoff standards, which now make it possible to determine not only the maximum flow rate but also the volume of water inflow to the road, currently allow for the accounting of water accumulation in front of the structure during short floods by using simple and convenient calculation methods.

Keywords: artificial structures, accumulation, hydrograph, runoff volume, discharge rate, log forms.

References

1. Bolshakov V.O., Kurghanovich O.O. Hydrological and hydraulic calculations. Kyiv: 1983. 197-200

2. Dadenkov Yu.M. Hydraulic calculation of small bridge openings taking into account water accumulation in front of the structure. Works of the Kyiv Automobile Road Institute. – Ministry of Culture of the USSR, Department of Construction Universities. Kyiv: 1953. pp. 65–83.

3. Kurghanovich O.O., Lyutik P.M. Hydrological justification for the design of bridge crossings: a textbook. Kyiv: KADI, 1977. - 130 p.

4. Bolshakov V.O., Kurghanovich O.O. Calculation of flow and openings of small bridges and corrugated pipes. Kyiv: 1966. 85-89 p.

5. Bolshakov V.O. Collection of problems in hydraulics. Kyiv 1979. 193-200 p.

6. Khomyak Ya.V. Hydraulic calculations of small bridges and road pipes. Kyiv. Automobile Road Institute, Department of Road Design. 1961. 92 p.

7. Dadenkov Yu.M. Research on rainwater drainage through small bridges. Abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Kyiv Polytechnic Institute. – Kyiv: 1952. 26 pp.

8. Dadenkov Yu.M. Establishing schedules for water inflow to structures based on observations of rainwater drainage through small bridges. Works of the Kyiv Automobile Road Institute. – Ministry of Culture of the USSR, Main Directorate of Mining, Metallurgical, and Construction Universities. Kyiv: 1955. Collection 2. pp. 116-118.

УДК 65. 012.7:656.02 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-203-210**
UDC 65. 012.7:656.02

ПРОЄКТНО-ОРІЄНТОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НАСЕЛЕННЯ МІСЬКИМ ГРОМАДСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ

PROJECT-ORIENTED MANAGEMENT FOR QUALITY PARAMETERS OF TRANSPORT SERVICE TO THE POPULATION BY URBAN PUBLIC TRANSPORT



Воркут Тетяна Анатоліївна *Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри логістики та проєктного менеджменту, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: vorkutt@ukr.net., тел. +38 0442544326,*

http://orcid.org/0000-0003-0354-476X



Дерегуз Ігор Андрійович *здобувач PhD, Національний транспортний університет, e-mail: derehuz@ukr.net, тел. +380634321538,*

https://orcid.org/0000-0003-3119-3709



Добровольська Анна Михайлівна*, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри логістики та проєктного менеджменту, Національний транспортний університет, e-mail: anet_chechet@ukr.net , тел. +380634321538,*

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



Ткаченко Олена Валеріївна*, асистент кафедри логістики та проєктного менеджменту, Національний транспортний університет, e-mail: tkcholena@gmail.com , тел. +380634321538,*

https://orcid.org/0009-0003-5901-3156

Анотація. В статті розглядаються умови застосування науково-методичних підходів проєктно-орієнтованого управління до визначення оптимальної сукупності заходів, які реалізуються в формі

проєктів. Передбачається, що ці проєкти ініціюються в припущенні, що вони впливатимуть на певні незалежні чинники. Дані чинники, в свою чергу, мають бути попередньо ідентифіковані за такі, що впливають на значення показника якості, який обрано за критеріальний. Запропоновано модель, яка, використовуючи метод цілочисельного програмування, дозволяє визначати оптимальну сукупність проєктів, які спрямовуються на покращення критеріїв якості транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом.

Ключові слова: оптимізація сукупностей проєктів транспортних процесів і систем, портфельно-орієнтоване управління транспортними процесами і системами, портфель проєктів транспортних процесів і систем.

Вступ. Підвищення результативності і ефективності функціонування та розвитку логістичних, і розглядуваних у їх складі транспортних, процесів і систем виступає за одне із нагальних завдань бізнесових і небізнесових організаційних структур. Водночас, у рамках відомих на сьогодні методів, у яких пропонуються різного характеру заходи для вирішення даного завдання, недостатньо уваги приділяється опрацюванню підходів до формування оптимального до реалізації складу цих заходів. Актуальним науковим завданням, таким чином, є розроблення науково-методичних підходів до формування оптимального складу заходів, зокрема, проєктного характеру, в рамках методів, спрямованих на покращення якості транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах оптимізації сукупності проєктів, спрямованих на покращення якості транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом, окремий інтерес являє вибір результативного критерію щодо оцінювання якості транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом. Аналіз і систематизація кількісних і якісних показників, які можуть бути використані у вищезазначеному контексті, має місце в ряді робіт, зокрема, в роботі [1]. В роботі [2] автори акцентують увагу на показнику тривалості пересування, звертаючись при цьому до питання, як окремі складові тривалості пересування сприймаються пасажирами. На надійності обслуговування користувачів послуг пасажирського транспорту зупиняються автори роботи [3], а на зручності поїздок у різні години доби – автори роботи [4]. Проте, робота [1] не розглядає системно проблематику оцінювання рівня якості надання транспортних послуг, як, до слова, і роботи [2-4]. Вони зупиняються лише на окремих параметрах послуг щодо забезпечення пересування населення громадським транспортом.

Для визначення критеріїв якості надання послуг громадським транспортом у роботі [5] запропоновано методологічний підхід, який базується на гібридній аналітиці ієрархічного процесу та методів критеріального аналізу «найкращий – найгірший». Однак обмеженість цього підходу в частині репрезентативності використовуваної в ньому моделі опитування не дає підстав до грунтовного поширення запропонованих рекомендацій на проблематику управління якістю надання транспортних послуг щодо всіх видів громадського транспорту.

В дослідженні [6] запропоновано модель управління якістю надання послуг громадським транспортом, яка бере до уваги думку користувачів та операторів, спираючись на генерування індексу якості та аналіз чутливості. Але, знов таки, брак системності залишає невирішеним питання узгодженості параметрів якості транспортного обслуговування, які доцільно було б використати в процесі оцінювання. Разом із тим, у відповідних дослідженнях наголошується, що оцінювання якості послуг взагалі, і транспортних зокрема, може здійснюватися за методологічними підходами SERVQUAL [7, 8], шести сигм [9] тощо. Водночас, підхід [7, 8] за своєю сутністю не враховує багатоаспектність параметрів транспортної системи, зокрема, стан навколишнього середовища, дорожньої інфраструктури та організацій перевізників. Процесний характер методу [9], який грунтується на підході шести сигм, не дозволяє його використовувати для обгрунтування параметрів впливу щодо якості транспортних послуг. Про останнє, зокрема, зазначається в роботі [10].

В роботах [10, 11] запропоновано метод для оцінювання рівня якості надання транспортних послуг громадським транспортом, який базується на бінарній статистичній моделі логістичної регресії [10, 12]. На відміну від вищезгадуваних методів оцінювання рівня якості надання транспортних послуг

населенню цей метод не є фрагментарним. Він реалізується за основними напрямами сервісної діяльності в сфері транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом. Це дозволяє розробити результатні і ефективні програми щодо управління параметрами якості надання транспортних послуг населенню, систематизовані за параметрами моделі логістичної регресії та співвідношенням шансів для окремих предикторів [10]. Водночас, не зупиняючись далі детально на порівнянні переваг і вад розглянутих методів оцінювання якості транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом, і взагалі відомих на сьогодні, маємо вказати на наступне – як на наукову проблему. А саме – використання даних методів у контексті управління параметрами якості транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом потребує опрацювання, в умовах об'єктивно існуючої обмеженості ресурсів, науково-методичних підходів до формування оптимального складу заходів, зокрема, проєктного характеру, в рамках вищезазначених методів.

Метою статті є розроблення моделі, яка дозволить визначати оптимальну сукупність проєктів, які спрямовуються на зміни в незалежних чинниках в умовах забезпечення досягнення встановленого цільового значення результативного критерію якості транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом, який (критерій) ідентифікується як залежний від вказаних незалежних чинників.

Викладення основного матеріалу. В умовах визначення оптимальної сукупності заходів, які реалізуються для підвищення результативності і ефективності функціонування та розвитку транспортних процесів і/або систем, можуть бути застосовані науково-методичні підходи портфельно-орієнтованого управління в організаціях [13, 14]. Ґрунтовність використання зазначених підходів має місце у випадку, коли вищезгадувані заходи реалізуються в формі проєктів. Зупинимось детальніше на ситуації, коли проєкти спрямовуються на зміни в значеннях окремих показників, які розглядаються за показники, що характеризують певні чинники, які впливають на значення показника, який виступає за результативний. При цьому існують об'єктивні передумови, щоб тлумачити дані чинники, і відповідні їм показники, за незалежні. Очевидно, результативний показник, або цільовий, розглядається як від них залежний. Зазначене, зокрема, має місце в методах управління транспортними процесами і/або системами, в межах яких, тобто, методів, передбачається застосування статистичних регресійних методів. Як відомо, за основні завдання застосування статистичних регресійних методів виступають: перевірка гіпотези (встановлення того, чи залежить одна, результативна, змінна – як залежна – від інших – незалежних); визначення величини впливу (встановлення, наскільки зміна однієї із незалежних змінних вплине на зміну іншої, залежної, як результативної) або, іншими словами, внеску окремих незалежних змінних у варіацію залежної; прогнозування (передбачення майбутніх значень результативної, як залежної, змінної на основі відомих значень незалежних змінних).

Саме вирішення в рамках статистичного регресійного аналізу другого завдання може надати інформацію стосовно того, на скільки відсотків зміниться результативна або, в іншій термінології, цільова, як залежна, величина, якщо змінні, які її визначають, зміняться на певний встановлений відсоток. Тобто, надати інформацію про значення коефіцієнта еластичності. В більш загальному випадку, мова також може йти про значення коефіцієнта чутливості.

До слова, в умовах проведення аналізу виробітку автомобільних транспортних засобів, задіяних на маятникових і розвізних маршрутах, у відомих першоджерелах, присвячених управлінню вантажними автомобільними перевезеннями, визначається коефіцієнт еластичності – як похідна від даного виробітку за техніко-експлуатаційними показниками, які входять до відповідних аналітичних залежностей, які цей виробіток описують. Як правило, оцінюється на скільки відсотків зміниться результативна величина, як залежна, при зміні показників, які її визначають, на 1%, або, іноді, для зручності розрахунків, на 10% [15].

Таке ж оцінювання ми маємо, наприклад, при аналізі ризику та невизначеності інвестиційних проєктів за методом аналізу чутливості. При цьому заходи щодо управління ризиком можуть розглядатися в якості окремих підроєктів загального проєкту. В рамках формування і реалізації цих підпроєктів має місце вплив на окремі часткові показники, які в свою чергу, впливають на

результативний показник, використовуваний для оцінювання ефективності загального інвестиційного проєкту через показники чистої приведеної вартості (цінності), внутрішньої ставки доходності, строку окупності тощо.

Будемо виходити із того, що проєктна ініціатива через позитивні, відносно покращення значення результативного показника, зміни у вихідних показниках забезпечує певний відсоток збільшення або зменшення результативного показника, залежно від полярності останнього. Тоді, в загальному випадку, цільову функцію за сукупністю відповідних проєктів, як портфелем (підпортфелем) даних проєктів, можна побудувати на основі забезпечуваної величини зміни значення відсотка за результативним показником. При цьому величина зміни значення відсотка за результативним показником потребує максимізації. За обмеження може слугувати бюджет, який виділяється на сукупність відповідних проєктів – як портфель (підпортфель) даних проєктів.

Узгоджуючись із вищезазначеним і використовуючи метод цілочисельного програмування, можна записати наступне:

$$\sum_{n=1}^{N} W_n x_n \to max, \tag{1}$$

за дії разом, чи вибірково, обмежень виду:

$$\sum_{n=1}^{N} W_n x_n \geq W_{p_{\text{гр.}}}, \tag{2}$$

$$\sum_{n=1}^{N} C_{k_n} x_n \leq C_{k_{p_{\text{гр}}}}, \tag{3}$$

$$\sum_{n=1}^{N} \sum_{t_{e_n}=1}^{T_{e_n}} \frac{C_{c_n t_{e_n}}}{(1+i_n)^{t_{e_n}}} x_n \leq C_{c_{p_{\text{гр}}}} \tag{4}$$

$$x_n = 0{,}1\ ,\ n = \overline{1,N}, \tag{5}$$

де W_n – відсоток зміни результативної величини, який забезпечується через реалізацію n-го проєкту портфеля (підпортфеля) проєктів, $n = \overline{1,N}$;

$W_{p_{\text{гр.}}}$ – граничне мінімальне значення для відсотка зміни результативної величини, який забезпечується через реалізацію портфеля (підпортфеля) проєктів;

C_{k_n} – капітальні витрати за n-м проєктом портфеля (підпортфеля) проєктів, $n = \overline{1,N}$;

$C_{k_{p_{\text{гр}}}}$ – граничне максимальне значення капітальних витрат, які можуть бути виділені на фінансування портфеля (підпортфеля) проєктів;

$C_{c_n t_{e_n}}$ – поточні витрати за n-м проєктом портфеля (підпортфеля) проєктів у часовому періоді t_{e_n}, $t_{e_n} = \overline{1,T_{e_n}}$, $n = \overline{1,N}$;

i_n – вартість капіталу за n-м проєктом портфеля (підпортфеля) проєктів, $n = \overline{1,N}$;

$C_{c_{p_{\text{гр}}}}$ – граничне максимальне значення поточних витрат, які можуть бути виділені на фінансування портфеля (підпортфеля) проєктів;

T_{e_n} – економічний строк життя n-го проєкту портфеля (підпортфеля) проєктів, $n = \overline{1,N}$;
N – кількість проєктів у портфелі (підпортфелі) проєктів.
Для визначення W_n, $n = \overline{1,N}$, використовується вираз виду:

$$W_n = l_n \cdot V_n \,, \tag{6}$$

де l_n – коефіцієнт еластичності за умовами зміни n-го вихідного показника при реалізації n-го проєкту портфеля (підпортфеля) проєктів, $n = \overline{1,N}$;

V_n – відсоток, на який змінюється n-й вихідний показник при реалізації n-го проєкту портфеля (підпортфеля) проєктів, $n = \overline{1,N}$.

Ми виходимо з того, що значення певного n-го показника планується змінити таким чином у рамках реалізації відповідного n-го проєкту, $n = \overline{1,N}$, щоб це позитивно вплинуло на результативний показник.

Прийняття до уваги в моделях оптимізації портфеля (підпортфеля) проєктів концепції вартості грошей у часі через введення процедур дисконтування актуалізує питання ступеня ризику – як індивідуального, тобто, щодо окремих проєктів, які входять до складу портфеля або підпортфеля (проєктного ризику), так і структурних ризиків – як ризиків, пов'язаних зі способом формування портфеля (підпортфеля) та ймовірними конфліктами між його компонентами, і глобальних ризиків – як ризиків, які перевищують суму ризиків окремих компонентів. Ризик окремих проєктів може враховуватися в бюджетах цих проєктів через збільшення останніх до 20%. Водночас, врахування наявності структурних ризиків і, можливо, частково глобальних ризиків за сукупностями проєктів, як можна очікувати, дозволить представлення цих сукупностей в якості портфелів (підпортфелів) [16].

Розглянемо умови застосування даної моделі в межах розробки методу управління параметрами якості транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом. Даний метод частково викладено в роботі [10].

Припустимо, що на результативний показник, за який розглядається показник тривалості пересування населення міським громадським транспортом, впливають наступні показники – як предиктори – щодо дорожніх заторів, швидкості сполучення, щільності розселення (розподілу територією). При цьому цільове, як вимагаємо нормативне, значення показника тривалості пересування складає 35 хв., а фактично ми маємо 38 хв. Таким чином, необхідно зменшити дане значення мінімально на 3 хв., або 7,9 %. Тобто, за умовами представленої моделі, $W_{p_{\text{гр.}}}$=7,9%.

В умовах, які розглядаються, коефіцієнт еластичності l_n, $n = \overline{1,3}$, за показником щодо дорожніх заторів дорівнює 0,29, за показником щодо швидкості сполучення – 0,28, за показником щодо щільності розселення – 0,32. При реалізації ідентифікованих проєктів, очікуємо мати наступні позитивні для результативного показника зміни в цих показниках: V_1=14,5%, V_2=16,0%, V_3=12,4%. Тобто W_1 = 4,2%, W_2 = 4,5%, W_3 = 4,0%. Обмеження по поточних витратах не вводяться. Обмеження по капітальних витратах за портфелем проєктів, $C_{k_{p_{\text{гр}}}}$, складає 100,0 тис. ум. гр. од. Капітальні витрати за проєктами наступні: C_{k1}=40,0 тис. ум. гр. од., C_{k2}=30,0 тис. ум. гр. од., C_{k3}=70,0 тис. ум. гр. од.

Зауважимо, що, гіпотетично, в загальному випадку, може бути кілька проєктів, які спрямовуються на покращення одного й того самого вихідного показника. Якщо такі проєкти розглядаються за залежні, то умови застосування представленої моделі потребують її модифікації. При цьому поняття незалежності щодо вихідних змінних і незалежності проєктів є відмінними. Це дозволяє використовувати дану модель і за умов виявлення залежності між проєктами, хоча вони і спрямовуються на покращення відмінних показників.

Виходячи із вищенаведеного, за результатами оптимізації до реалізації можуть бути рекомендовані проєкти, спрямовані на покращення показників щодо дорожніх заторів (зменшення) і швидкості сполучення (збільшення). Це дозволить досягти зменшення показника тривалості

пересування населення міським громадським транспортом на 8,7% при загальному рівні капіталовкладень у відповідні проєкти на рівні 70,0 тис. ум. гр. од.

Висновки. Запропоновано модель для визначення оптимальної сукупності проєктів, як портфеля проєктів, які спрямовуються на зміни в незалежних чинниках в умовах забезпечення досягнення встановленого цільового значення результативного критерію якості транспортного обслуговування населення міським громадським транспортом, який (критерій) ідентифікується як залежний від вказаних незалежних чинників. Дана модель може бути використана в межах вдосконалення і подальшого розвитку широкого кола моделей і методів, які стосуються проблематики управління параметрами, в тому числі, якості, транспортного обслуговування, зокрема, населення міським громадським транспортом.

Перелік посилань

1. Jamal, S., Newbold, K. B. (2020). Factors associated with travel behavior of millennials and older adults: a scoping review. Sustainability, 12(19), 8236. https://doi.org/10.3390/su12198236

2. De Vos, J., Ermagun, A., & Shaw, F. A. (2023). Wait time, travel time and waiting during travel: existing research and future directions. Transport reviews, 43(5), 805-810. https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2220206

3. Rashidi, S., Ataeian, S., Ranjitkar, P. (2023) Estimating bus dwell time: A review of the literature. Transport Reviews, vol. 43, issue 1, 32-61 https://doi.org/10.1080/01441647.2021.2023692

4. Merlin, L. A., Jehle, U. (2023). Global Interest in Walkability: An Overview Transport Reviews, no. 43, issue 5, 1021-1054. https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2189323

5. Moslem, S., Alkharabsheh, A., Ismael, K., & Duleba, S. (2020). An integrated decision support model for evaluating public transport quality. Applied Sciences, 10(12), 4158. https://doi.org/10.3390/app10124158

6. Santos, J. B., & Lima, J. P. (2021). Quality of public transportation based on the multi-criteria approach and from the perspective of user's satisfaction level: A case study in a Brazilian city. Case Studies on Transport Policy, 9(3), 1233-1244. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.05.015

7. Тарандушка, Л.А., Шльончак, І.А., & Тарандушка, І. П. (2022). Оцінка якості обслуговування пасажирів міським транспортом загального користування в м. Черкаси. Кропивницький: Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, Вип. 5 (36), Ч. 2, 253–261. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.253-261

8. Watthanaklang, D., Jomnonkwao, S., Champahom, T., & Wisutwattanasak, P. (2024). Exploring accessibility and service quality perceptions on local public transportation in Thailand. Case Studies on Transport Policy, 15, 101144. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101144.

9. Saad, N. A. (2023) Deployment of Lean Six Sigma in Transportation Sector. International Journal of Empirical Research Methods, Volume 1, Issue 2, 74-80. https://doi.org/10.59762/ijerm205275791220231205140246

10. Melnychenko, O., Ignatenko, O., Tsybulskyi, V., Degtiarova, A., Kashuba, M., & Derehuz, I. (2024). Development of a mechanism for information security risk management of transport service provision systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *1*(3 (127), 27–36. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298144

11. Добровольська А.М., Дерегуз І.А. Концептуальні підходи до оцінювання рівня якості надання послуг міським громадським транспортом. Multidisciplinární mezinárodní vědecký magazín “Věda a perspektivy” je registrován v České republice. Státní registrační číslo u Ministerstva kultury ČR: E 24142. № 5(48) 2025. str. 329-340. https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-5(48)-329-340

12. Kharchenko, A., Tsybulskyi, V., Chechuha, O., Zavorotnii, S., & Shuliak, I. (2022). Building a model for managing the cost and duration of motor road projects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(3 (117), 13–22. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.256213

13. Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge – Fourth Edition, Project Management Institute Inc, 2008, 467 p.

14. Портфельно-орієнтоване управління в організаційних мережах. Монографія / Т.А. Воркут, О.Є. Білоног, А.М. Дмитриченко, А.В. Петунін, Н.В. Срібна, Ю.О. Третиниченко. Київ: Міленіум, 2021. 227 с.

15. Управління ланцюгами постачань швидкопсувних продуктів харчування. Монографія / Т.А. Воркут, О.Є. Білоног, Л.М. Волинець, А.В. Петунін, О.Ю. Сопоцько, І.І. Халацька. Київ: Міленіум, 2022. 239 с.

16. Проблеми управління проєктами громадської участі у містах України. Монографія / Воркут Т.А., Божок Ю.О., Петунін А.В., Харута В.С. Київ: Міленіум, 2024. 145 с.

PROJECT-ORIENTED MANAGEMENT FOR QUALITY PARAMETERS OF TRANSPORT SERVICE TO THE POPULATION BY URBAN PUBLIC TRANSPORT

Vorkut Tetyana A., Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Logistics and Project Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, vorkutt@ukr.net, (+38 044) 254-43-26, http://orcid.org/0000-0003-0354-476X

Derehuz Igor A., PhD candidate, National Transport University, Department of Logistics and Project Management, Kyiv, Ukraine, derehuz@ukr.net, http://orcid.org/0000- 0003-3119-3709

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

Tkachenko Olena V., National Transport University, Assistant of Department of Logistics and Project Management, e-mail: tkcholena@gmail.com, тел. +380634321538, https://*orcid.org/0009-0003-5901-3156*

Summary.

The relevance of the research topic is due to the need to develop a model to determine the optimal set of projects.

The aim of the article is to develop a model that will allow determining the optimal set of projects aimed at changes in independent factors in the conditions of ensuring the achievement of the established target value of the effective criterion of the quality of transport service of the population by urban public transport, which (criterion) is identified as dependent on the specified independent factors.

The article considers the conditions for applying scientific and methodological approaches to project-oriented management to determine the optimal set of measures that are implemented in the form of projects. It is assumed that these projects are initiated on the assumption that they will affect certain independent factors. These factors, in turn, must be previously identified as those that affect the value of the quality indicator chosen as the criterion.

A model is proposed to determine the optimal set of projects, as a portfolio of projects aimed at changes in independent factors in the conditions of ensuring the achievement of the established target value of the effective criterion of the quality of transport service of the population by urban public transport, which (criterion) is identified as dependent on the specified independent factors. This model can be used within the framework of the improvement and further development of a wide range of models and methods related to the issues of parameter management, including the quality of transport service, in particular, the population by urban public transport.

Key words: optimization of sets of transport process and system projects, portfolio-oriented management of transport processes and systems, portfolio of transport process and system projects.

References

1. Jamal, S., Newbold, K. B. (2020). Factors associated with travel behavior of millennials and older adults: a scoping review. Sustainability, 12(19), 8236. https://doi.org/10.3390/su12198236

2. De Vos, J., Ermagun, A., & Shaw, F. A. (2023). Wait time, travel time and waiting during travel: existing research and future directions. Transport reviews, 43(5), 805-810. https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2220206

3. Rashidi, S., Ataeian, S., Ranjitkar, P. (2023) Estimating bus dwell time: A review of the literature. Transport Reviews, vol. 43, issue 1, 32-61 https://doi.org/10.1080/01441647.2021.2023692

4. Merlin, L. A., Jehle, U. (2023). Global Interest in Walkability: An Overview Transport Reviews, no. 43, issue 5, 1021-1054. https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2189323

5. Moslem, S., Alkharabsheh, A., Ismael, K., & Duleba, S. (2020). An integrated decision support model for evaluating public transport quality. Applied Sciences, 10(12), 4158. https://doi.org/10.3390/app10124158

6. Santos, J. B., & Lima, J. P. (2021). Quality of public transportation based on the multi-criteria approach and from the perspective of user's satisfaction level: A case study in a Brazilian city. Case Studies on Transport Policy, 9(3), 1233-1244. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.05.015

7. Tarandushka, L.A., Shlyonchak, I.A., & Tarandushka, I. P. (2022). Assessment of the quality of passenger service by public urban transport in the city of Cherkasy. Kropyvnytskyi: Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Vol. 5 (36), Part 2, 253–261. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.253-261

8. Watthanaklang, D., Jomnonkwao, S., Champahom, T., & Wisutwattanasak, P. (2024). Exploring accessibility and service quality perceptions on local public transportation in Thailand. Case Studies on Transport Policy, 15, 101144. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101144.

9. Saad, N. A. (2023) Deployment of Lean Six Sigma in Transportation Sector. International Journal of Empirical Research Methods, Volume 1, Issue 2, 74-80. https://doi.org/10.59762/ijerm205275791220231205140246

10. Melnychenko, O., Ignatenko, O., Tsybulskyi, V., Degtiarova, A., Kashuba, M., & Derehuz, I. (2024). Development of a mechanism for information security risk management of transport service provision systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *1*(3 (127), 27–36. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298144

11. Dobrovolska A.M., Dereguz I.A. Conceptual approaches to assessing the quality level of urban public transport services. Multidisciplinary international scientific magazine “Science and Perspectives” is registered in the Czech Republic. State registration number at the Ministry of Culture of the Czech Republic: E 24142. No. 5(48) 2025. pp. 329-340. https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-5(48)-329-340

12. Kharchenko, A., Tsybulskyi, V., Chechuha, O., Zavorotnii, S., & Shuliak, I. (2022). Building a model for managing the cost and duration of motor road projects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(3 (117), 13–22. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.256213

13. Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge – Fourth Edition, Project Management Institute Inc, 2008, 467 p.

14. Portfolio-oriented management in organizational networks. Monograph / T.A. Vorkut, O.E. Bilonog, A.M. Dmytrichenko, A.V. Petunin, N.V. Sribna, Yu.O. Tretynychenko. Kyiv: Millennium, 2021. 227 p.

15. Supply chain management of perishable food products. Monograph / T.A. Vorkut, O.E. Bilonog, L.M. Volynets, A.V. Petunin, O.Yu. Sopotsko, I.I. Khalatska. Kyiv: Millennium, 2022. 239 p.

16. Problems of managing public participation projects in cities of Ukraine. Monograph / T.A. Vorkut, O.E. Bozhok, Yu.O. Petunin A.V., Kharuta V.S. Kyiv: Millennium, 2024. 145 p.

УДК 004.9:37.018.43
UDC 004.9:37.018.43

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-211-216

СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ТРАЄКТОРІЇ НАВЧАННЯ В АДАПТИВНИХ ОСВІТНІХ СИСТЕМАХ

SYSTEM MODEL FOR FORMING AN INDIVIDUAL LEARNING TRAJECTORY IN ADAPTIVE EDUCATIONAL SYSTEMS



***Козачук Олена Ігорівна**, аспірантка, кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Національного транспортного університету, 01010, м. Київ, Україна, e-mail: kozachuk_olena517@ukr.net¶,*

https://orcid.org/0000-0002-3823-6057

Анотація. У статті розглянуто метод формування індивідуальної траєкторії навчання в адаптивних освітніх системах, що функціонують у цифровому та інтернет-орієнтованому середовищі. Актуальність дослідження зумовлена зростанням потреби в персоналізації освітнього процесу в умовах цифровізації освіти, різнорівневої підготовки здобувачів освіти та динамічної зміни вимог до результатів навчання. У традиційних освітніх моделях навчальний контент подається за фіксованою програмою, що не враховує індивідуальні особливості, рівень підготовленості та темп засвоєння матеріалу кожного здобувача освіти, що знижує ефективність навчання.

У роботі запропоновано метод формування індивідуальної траєкторії навчання на основі аналізу знаннєвих, поведінкових та результативних показників діяльності здобувачів освіти в адаптивній освітній системі. Метод передбачає інтеграцію освітнього контенту, профілю користувача та механізмів адаптації, що забезпечують динамічну перебудову навчального маршруту відповідно до рівня сформованості знань, умінь і компетентностей [1]. Формування індивідуальної траєкторії здійснюється шляхом поетапного коригування структури та складності навчального матеріалу, вибору темпу навчання, типів навчальних ресурсів і форм контролю результатів навчальної діяльності.

У межах дослідження розроблено концептуальну модель методу формування індивідуальної траєкторії навчання, яка ґрунтується на взаємодії трьох ключових компонентів: освітнього контенту, здобувача освіти та аналітичного ядра адаптивної системи. Аналітичне ядро забезпечує збір, обробку та інтерпретацію даних про навчальну активність користувачів, результати контролю знань та динаміку навчального прогресу, що є основою для прийняття рішень щодо адаптації навчального процесу. Запропонований метод дозволяє гнучко формувати індивідуальні навчальні маршрути з урахуванням як поточного стану знань, так і прогнозування подальших освітніх потреб [2].

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості впровадження запропонованого методу в цифрові освітні платформи та системи дистанційного і змішаного навчання для підвищення ефективності засвоєння навчального матеріалу. Використання методу сприяє підвищенню мотивації здобувачів освіти, зменшенню навчальних перевантажень та забезпечує підтримку індивідуальних освітніх траєкторій упродовж усього періоду навчання.

Ключові слова: інтелектуалізація, персоналізація, модель, алгоритм, системний аналіз, адаптивне навчання, метод, індивідуалізація, цифровізація.

Вступ. Сучасний етап розвитку освіти характеризується активною цифровізацією навчального процесу та широким упровадженням інформаційно-комунікаційних технологій у всі його складові. В умовах зростання обсягів навчальної інформації, різнорівневої підготовки здобувачів освіти та підвищених вимог до результатів навчання особливої актуальності набуває проблема формування індивідуальної траєкторії навчання. Традиційні підходи до організації освітнього процесу, засновані на уніфікованих навчальних програмах і однакових темпах засвоєння матеріалу, не забезпечують у повній мірі врахування індивідуальних освітніх потреб, пізнавальних можливостей і особливостей навчальної діяльності кожного здобувача освіти.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від стандартизованих моделей навчання до адаптивних освітніх систем, орієнтованих на персоналізацію освітнього процесу. Адаптивні освітні системи, що функціонують на базі Інтернет, дають змогу здійснювати динамічну адаптацію навчального контенту, форм і методів навчання відповідно до індивідуальних характеристик здобувачів освіти [3]. Однак на сьогодні залишається недостатньо розробленою проблема формалізації методів формування індивідуальної траєкторії навчання, які б ґрунтувалися на комплексному аналізі навчальних даних та забезпечували гнучке керування навчальним процесом у реальному часі.

Нещодавні дослідження в галузі ІТ-освіти в електронному середовищі зосереджені на багатьох аспектах, включаючи ефективність та результативність цієї системи, специфіку навчання в онлайн-середовищі та використання інноваційних технологій для покращення навчального процесу [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що питання адаптивного навчання, персоналізації освітнього процесу та використання цифрових освітніх середовищ активно досліджуються як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями. У працях розглядаються концепції адаптивних навчальних систем, моделі профілю здобувача освіти, методи аналізу навчальних даних, а також підходи до побудови індивідуальних навчальних маршрутів. Водночас більшість досліджень зосереджено на окремих аспектах адаптації — змісті навчального контенту, темпі навчання або формах контролю, — що ускладнює практичне впровадження цілісної методики формування індивідуальної траєкторії навчання в рамках єдиної адаптивної освітньої системи [5].

У зв’язку з цим виникає потреба у розробці методу формування індивідуальної траєкторії навчання, який поєднував би аналіз навчальних результатів, поведінкових характеристик здобувачів освіти та механізмів адаптації освітнього контенту в цифровому середовищі.

Метою статті є розроблення та обґрунтування методу формування індивідуальної траєкторії навчання в адаптивних освітніх системах на базі Інтернет.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачається вирішення таких завдань:

- проаналізувати сучасні підходи до формування індивідуальних траєкторій навчання в цифрових освітніх системах;
- визначити основні компоненти адаптивної освітньої системи, що впливають на персоналізацію навчального процесу;
- розробити метод формування індивідуальної траєкторії навчання на основі аналізу навчальних даних;
- обґрунтувати переваги запропонованого методу з позицій підвищення ефективності та якості навчання.

Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів. Процес формування індивідуальної траєкторії навчання в адаптивних освітніх системах реалізується як послідовна взаємодія освітнього контенту, профілю здобувача освіти та аналітичного ядра системи [6]. Запропонований метод має циклічний характер та забезпечує безперервну адаптацію навчального процесу відповідно до індивідуальних освітніх потреб користувача, що відображено на рисунку 1.

На першому етапі формування індивідуальної траєкторії навчання освітній контент надходить до адаптивної освітньої системи у вигляді структурованих навчальних модулів. Кожен модуль характеризується рівнем складності, формою подання навчального матеріалу та засобами контролю результатів навчання. Така організація контенту створює основу для подальшої адаптації навчального маршруту залежно від характеристик здобувача освіти.



Рисунок 1 - Схема системної моделі формування індивідуальної траєкторії навчання в адаптивній освітній системі

Figure 1 – Diagram of the system model for forming an individual learning trajectory in an adaptive educational system

Другий етап пов'язаний із побудовою та актуалізацією профілю здобувача освіти. Профіль формується на основі вихідної діагностики рівня знань, аналізу навчальної активності та результатів виконання завдань у цифровому освітньому середовищі. До ключових показників профілю належать рівень засвоєння навчального матеріалу, темп навчання, кількість допущених помилок та інтенсивність взаємодії з навчальними ресурсами. Формування профілю здійснюється динамічно та уточнюється після кожного навчального етапу.

Центральною ланкою запропонованого методу є аналітичне ядро адаптивної освітньої системи, яке забезпечує обробку навчальних даних та прийняття рішень щодо подальшого перебігу навчального процесу. Як показано на рисунку 1, аналітичне ядро виконує функції збору даних, аналізу результатів навчальної діяльності та визначення умов адаптації освітнього контенту. На цьому етапі відбувається зіставлення поточних показників профілю здобувача освіти із запланованими результатами навчання, що дозволяє виявити прогалини в знаннях або, навпаки, готовність до переходу на складніший рівень.

На основі результатів аналітичної обробки даних формується індивідуальна траєкторія навчання, яка включає вибір послідовності навчальних модулів, рівня складності завдань, темпу

опрацювання матеріалу та форм контролю [7]. У разі виявлення низьких результатів система пропонує додаткові навчальні матеріали або змінює структуру навчального маршруту. Якщо ж рівень підготовки здобувача освіти відповідає або перевищує очікувані показники, індивідуальна траєкторія коригується шляхом ускладнення завдань або прискорення проходження навчальних модулів.

Завершальним етапом процесу є реалізація корекційного циклу, який передбачає повторне надходження оновлених даних до аналітичного ядра системи. Таким чином забезпечується безперервний зворотний зв'язок між освітнім контентом, профілем здобувача освіти та механізмами адаптації. Циклічність процесу, відображена на рисунку 1, дозволяє підтримувати актуальність індивідуальної траєкторії навчання протягом усього періоду навчання та забезпечує гнучке реагування на зміну навчальних потреб [8].

Отримані результати дослідження підтверджують, що запропонований метод формування індивідуальної траєкторії навчання забезпечує узгодженість усіх компонентів адаптивної освітньої системи, сприяє підвищенню ефективності навчального процесу та створює умови для реалізації індивідуалізованого підходу в цифровому освітньому середовищі [9].

Висновки. У статті розв'язано актуальну науково-практичну задачу формування індивідуальної траєкторії навчання в адаптивних освітніх системах, що функціонують у цифровому та інтернет-орієнтованому середовищі. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність використання адаптивного підходу для персоналізації навчального процесу з урахуванням індивідуальних освітніх потреб, рівня підготовки та динаміки навчальної діяльності здобувачів освіти.

Запропоновано метод формування індивідуальної траєкторії навчання, який базується на узгодженій взаємодії освітнього контенту, профілю здобувача освіти та аналітичного ядра адаптивної освітньої системи [10]. Метод передбачає циклічний процес діагностики, аналізу навчальних даних, прийняття рішень і коригування навчального маршруту, що забезпечує безперервну адаптацію освітнього процесу. Розроблена структурна схема методу наочно відображає логіку формування та актуалізації індивідуальної навчальної траєкторії відповідно до змін у рівні навчальних досягнень здобувачів освіти.

Отримані результати свідчать, що застосування запропонованого методу дозволяє підвищити ефективність засвоєння навчального матеріалу, оптимізувати навчальне навантаження та сприяти підвищенню мотивації здобувачів освіти до навчальної діяльності. Метод є універсальним та може бути інтегрований у сучасні системи дистанційного, змішаного і традиційного навчання без необхідності кардинальної зміни їх архітектури.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямі пов'язані з розширенням методів аналізу навчальних даних із використанням алгоритмів машинного навчання для більш точного прогнозування індивідуального навчального прогресу. Доцільним є дослідження можливостей автоматизації процесу формування навчальних траєкторій з урахуванням професійної спрямованості здобувачів освіти, а також розроблення механізмів оцінювання ефективності адаптивних рішень у довгостроковій перспективі. Окремим напрямом є практична апробація запропонованого методу в реальних цифрових освітніх середовищах та його вдосконалення з урахуванням результатів педагогічного експерименту.

Перелік посилань

1. Сисоєва С.О. Індивідуальна освітня траєкторія як фактор підвищення якості вищої освіти. *Педагогічна освіта: теорія і практика*. Київ, 2020. Вип. 28. С. 15–23.

2. Кремень В.Г., Луговий В.І., Регейло І.Ю. Освіта в умовах цифрової трансформації суспільства : монографія. Київ : ДП «НВП «Поліграфсервіс», 2021. 320 с..

3. Биков В.Ю. Цифрове освітнє середовище: концептуальні засади та напрями розвитку. *Інформаційні технології і засоби навчання*. Київ, 2020. Т. 76, № 2. С. 1–15.

4. Кульбовський І.І., Козачук О.І. Аналітичні аспекти системи ІТ-освіти в електронному середовищі. *Наука і техніка сьогодні*: науковий журнал. Київ, 2023. № 8 (22). С. 309–323. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-8(22)

5. Morze N., Buinytska O., Varchenko-Trotsenko L. Digital competence of teachers as a prerequisite for the development of adaptive learning environments. *Information Technologies and Learning Tools*. Kyiv, 2021. Vol. 83, No. 3. P. 22–38.
6. Samuels S., McDonald K. Adaptive learning systems and personalized learning paths in higher education. *Educational Technology Research and Development*. 2020. Vol. 68, No. 2. P. 945–965.
7. Drachsler H., Kalz M., Van Bruggen J. Learning analytics as a tool for shaping personalised learning trajectories. *British Journal of Educational Technology*. 2021. Vol. 52, No. 4. P. 1648–1664.
8. Holmes W., Bialik M., Fadel C**.** Artificial intelligence in education: Promises and implications for teaching and learning. Boston : Center for Curriculum Redesign, 2021. 195 p.
9. UNESCO. Artificial intelligence in education: Challenges and opportunities. Paris, 2021. 45 p. URL: https://unesdoc.unesco.org (дата звернення: 12.11.2025).
10. OECD. Personalised learning and digital technologies. Paris: OECD Publishing, 2020. 112 p. URL: https://www.oecd.org (дата звернення: 20.11.2025).

SYSTEM MODEL FOR FORMING AN INDIVIDUAL LEARNING TRAJECTORY IN ADAPTIVE EDUCATIONAL SYSTEMS

Olena Kozachuk, PhD student, Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, National Transport, Kyiv, Ukraine, e-mail: kozachuk_olena517@ukr.net
https://orcid.org/0000-0002-3823-6057

Abstract. The article examines a method for forming an individual learning trajectory in adaptive educational systems operating within a digital and Internet-oriented environment. The relevance of the study is determined by the growing need for personalization of the educational process in the context of digitalization of education, the heterogeneous level of learners' prior knowledge, and the dynamic changes in requirements for learning outcomes. In traditional educational models, learning content is delivered according to a fixed curriculum that does not take into account individual characteristics, the level of preparedness, or the pace of learning of each learner, which reduces the overall effectiveness of the educational process.

The paper proposes a method for forming an individual learning trajectory based on the analysis of cognitive, behavioral, and performance indicators of learners' activities within an adaptive educational system. The method involves the integration of educational content, a learner profile, and adaptation mechanisms that ensure dynamic restructuring of the learning path according to the level of acquired knowledge, skills, and competencies. The formation of an individual learning trajectory is carried out through step-by-step adjustment of the structure and complexity of learning materials, selection of an appropriate learning pace, types of educational resources, and forms of assessment of learning outcomes.

Within the framework of the study, a conceptual model of the method for forming an individual learning trajectory has been developed. The model is based on the interaction of three key components: educational content, the learner, and the analytical core of the adaptive system. The analytical core provides collection, processing, and interpretation of data on learners' educational activity, assessment results, and learning progress dynamics, which serve as the basis for decision-making regarding the adaptation of the learning process. The proposed method enables flexible formation of individual learning paths, taking into account both the current state of learners' knowledge and the forecasting of their future educational needs.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of implementing the proposed method in digital educational platforms and distance and blended learning systems to improve the effectiveness of learning. The use of the method contributes to increased learner motivation, reduced learning overload, and sustained support of individual learning trajectories throughout the entire period of study.

Keywords: intellectualization, personalization, model, algorithm, systems analysis, adaptive learning, method, individualization, digitalization.

References:

1. Sysoieva S.O. Indyvidualna osvitnia traiektoriia yak faktor pidvyshchennia yakosti vyshchoi osvity (Individual educational trajectory as a factor of improving the quality of higher education). *Pedahohichna osvita: teoriia i praktyka*. Kyiv, 2020. Is. 28. P. 15–23 [in Ukrainian].

2. Kremen V.H., Luhovyi V.I., Reheilo I.Yu. Osvita v umovakh tsyfrovoi transformatsii suspilstva (Education in the conditions of digital transformation of society) : Monograph. Kyiv : Polihrafservis, 2021. 320 p. [in Ukrainian].

3. Bykov V.Yu. Tsyfrove osvitnie seredovyshche: kontseptualni zasady ta napriamy rozvytku (Digital educational environment: conceptual foundations and development directions). *Information Technologies and Learning Tools*. Kyiv, 2020. Vol. 76, No. 2. P. 1–15 [in Ukrainian].

4. Kulbovskyi I.I., Kozachuk O.I. Analytical aspects of the IT education system in the electronic environment. *Science and Technology Today*. Kyiv, 2023. No. 8 (22). P. 309–323. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-8(22)

5. Morze N., Buinytska O., Varchenko-Trotsenko L. Digital competence of teachers as a prerequisite for the development of adaptive learning environments. *Information Technologies and Learning Tools*. Kyiv, 2021. Vol. 83, No. 3. P. 22–38.

6. Samuels S., McDonald K. Adaptive learning systems and personalized learning paths in higher education. *Educational Technology Research and Development*. 2020. Vol. 68, No. 2. P. 945–965.

7. Drachsler H., Kalz M., Van Bruggen J. Learning analytics as a tool for shaping personalised learning trajectories. *British Journal of Educational Technology*. 2021. Vol. 52, No. 4. P. 1648–1664.

8. Holmes W., Bialik M., Fadel C. Artificial intelligence in education: Promises and implications for teaching and learning. Boston : Center for Curriculum Redesign, 2021. 195 p.

9. UNESCO. Artificial intelligence in education: Challenges and opportunities. Paris, 2021. URL: https://unesdoc.unesco.org (Last accessed: 12.11.2025).

10. OECD. Personalised learning and digital technologies. Paris: OECD Publishing, 2020. URL: https://www.oecd.org (Last accessed: 20.11.2025).

УДК 331.4:658
UDC 331.4:658

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-217-229

ІНТЕГРОВАНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКІВ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ

INTEGRATED APPROACH TO RISK MODELING AND MITIGATION IN THE OCCUPATIONAL SAFETY MANAGEMENT SYSTEM OF TRANSPORT INDUSTRY ENTERPRISES



Kharuta Vitaliy S., *candidate of science in engineering, National Transport University, Kyiv, Ukraine, kharuta_vitaliy@ukr.net,*

http://orcid.org/0000-0002-8897-7558



Sorochynska Olena I., *кандидат історичних наук, National Transport University, Kyiv, Ukraine, o.sorochynska@ntu.edu.ua,*

http://orcid.org/0000-0003-2477-1275



Kulbovskyi Ivan I., *кандидат технічних наук, National Transport University, Kyiv, Ukraine, i.kulbovskiy@ntu.edu.ua,*

http://orcid.org/0000-0002-5329-3842



Staruk Oleksandr S., *postgraduate student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, oleksandr.staruk@gmail.com*

http://orcid.org/0009-0004-9475-2592

Abstract. The article analyzes modern approaches to occupational safety management at transport enterprises, taking into account the latest challenges, risks and trends. The need for systematic identification and assessment of risks arising in the process of production activities of transport enterprises is substantiated, taking into account the specifics of technological processes and hazard factors. Mechanisms for combining

occupational safety standards, environmental management and quality management systems into a single integrated system are proposed to increase the level of personnel safety and reduce production risks. Particular attention is paid to the application of preventive measures, monitoring and continuous improvement of safety procedures. The implementation of an integrated approach allows ensuring the sustainable development of transport enterprises, reducing the likelihood of emergency situations and increasing the effectiveness of management decisions in the field of occupational safety**.**

The object of research is the occupational health and safety management system at transport industry enterprises.

The purpose of the work is to substantiate and develop an integrated approach to risk management in the occupational health and safety management system at transport enterprises in order to increase the level of employee safety, reduce production risks, and ensure sustainable development of the enterprise.

Research methods - analytical.

Modern and high-quality management of labor protection at enterprises is one of the priority areas of enterprise activity in terms of reducing industrial injuries, improving working conditions and improving the microclimate at the enterprise. In order to effectively manage labor protection at enterprises of the transport industry, the authors of this article propose to introduce a new modern model of the labor protection management system based on a strategy for preventing the occurrence of hazards and risks at workplaces. The purpose of the study is to determine the correct approach to organizing the labor protection system at enterprises of the transport industry through an integrated approach to risk management, as well as modeling the process of improving the state of labor protection at enterprises.

The results of the research can be recommended for implementation in the occupational safety management system at enterprises of Ukraine.

Keywords: risk-based management, occupational health and safety, transport, occupational safety, production process, model, methodology, digital technologies, identification, optimization.

Problem statement.

Modern transport enterprises operate in highly dynamic industrial environments, where rapid technological changes and organizational transformations create significant risks for personnel. Despite the increased requirements for occupational safety, the level of injuries and accidents in the transport industry remains a pressing problem. One of the key challenges is the lack of effectiveness of traditional approaches to risk management, which are based mainly on rapid measures after incidents occur, rather than on systematic forecasting and prevention of potentially dangerous situations. In such conditions, an important task is the development of models that allow for rapid and accurate risk assessment, forecasting their dynamics and implementing effective measures to reduce them. Thus, the research problem is the need to create integrated approaches and models for systemic risk management in occupational safety at transport enterprises, which allow minimizing the likelihood of accidents and ensuring the sustainability of production processes in dynamic industrial environments.

Analysis of recent research and publications. Analysis of scientific research shows that the issues of modeling and risk management in occupational safety are actively studied both in Ukraine and abroad. Domestic scientists V.A. Tsopa, S.I. Cheberyachko, O.O. Yavorska, O.V. Deryugin, A.P. Bochkovsky and others [1-5] investigate the features of assessing occupational risks in the transport sector and propose integrated approaches to their reduction. Foreign authors S. Ismael, J. Chen, Y. Zhang, A. Tewari, A. Paiva [6-9] focus on creating dynamic and probabilistic models that allow predicting hazardous production situations in a changing environment. The works substantiate the feasibility of using system dynamics, Bayesian methods and computer modeling to increase the effectiveness of risk management. At the same time, the issue of integrating such models into occupational health and safety management systems of transport enterprises remains understudied, which determines the relevance of further research in this area.

The purpose of the article is to substantiate and develop approaches to the comprehensive implementation of the risk management process in occupational safety management systems of transport enterprises. To achieve this goal, the following tasks are planned: to analyze modern scientific approaches to

assessing occupational risks, to determine the features of their manifestation in the dynamic conditions of the transport industry, to investigate the impact of industrial hazards on the level of occupational safety, to develop risk management models, and to formulate practical recommendations for improving the occupational safety system and reducing the likelihood of dangerous situations.

Presentation of the main material.

The most effective, recognized in the world strategy for ensuring and maintaining the highest possible level of occupational safety and health is the strategy for preventing the occurrence of hazards in the workplace. It involves the development of safety precautions based on the procedure for assessing the relevant risks. This strategy is the foundation of the regulatory and legal framework for occupational safety in developed countries of the European Union and is constantly revised taking into account modern problems of protecting workers from accidents and occupational diseases.

Within the framework of the Association Agreement with the European Union, Ukraine has undertaken the obligation to gradually, over several years, reform its own legislative framework by implementing and harmonizing relevant regulatory acts. Thus, during the specified period, all business entities, without exception, must automatically adopt a fundamentally new for many risk-oriented strategy for ensuring comfortable, safe and healthy working conditions.

One of the first steps towards such a transition was the adoption of the Concept of reforming the occupational safety and health management system in Ukraine and the development of a draft of the new Law of Ukraine "On Occupational Safety and Health of Employees", which has been submitted for public review and discussion and is to replace the current Law of Ukraine "On Occupational Safety and Health" [10]. The provisions of the Concept and the requirements of the new law provide for the creation of fundamentally new occupational safety and health management systems (OSHMS) at enterprises, the functioning of which is based on the principles of managing the risks of occupational hazards (Article 8 of the draft Law) [11]. To this end, business entities must carry out risk assessment procedures at each workplace and develop and implement appropriate safety measures and means based on the results of such an assessment.

The danger of the transport industry is due to the increased dynamism of production processes, a high level of mechanization, the operation of complex equipment and the influence of the human factor. Transport is a high-risk area, where any deviations from technological standards or non-compliance with safety rules can lead to significant material damage, injuries or even death. Of particular difficulty is the multi-level interaction of people, technology and the environment, which requires an integrated approach to risk management and occupational safety.

When studying occupational safety issues, special attention should be paid to the specifics of the transport industry, which covers a wide range of activities - from freight and passenger transportation to vehicle maintenance, infrastructure work and logistics operations. Each of these areas has its own set of potential hazards: mechanical, electrical, ergonomic, chemical and psychophysiological risks. Thus, in road transport, the main risk factors are high speed, heavy traffic, driver fatigue and the human factor, while in rail or air transport, technological risks associated with the operation of complex equipment dominate.

It is important to note that the transport industry is not only a high-risk, but also a socially significant sphere, since the functioning of the state economy depends on its stable operation. Therefore, increasing the level of occupational safety in transport enterprises is not only of production, but also of strategic importance. The introduction of risk-based occupational safety management systems will contribute to the reduction of occupational injuries, the increase of safety culture and the strengthening of the reputation of the industry as a whole.

In order to form a risk-based occupational health and safety management system (OHSMS) at transport enterprises, it is first necessary to introduce systematic hazard identification, risk assessment, and development of preventive measures to reduce or eliminate them.

The implementation of occupational risk assessment is aimed at implementing a continuous process:

– identifying new hazards that are present or may appear during production activities, and monitoring already identified hazards;

– determining the probability of hazards occurring and predicting the possible consequences of their impact on the employee;

– managing occupational risks in order to reduce their magnitude.

Hazard identification, assessment and management of occupational risks in the field of occupational safety is carried out:

– by type of work;

– at the workplace.

An integrated model of risk assessment and management stages at transport enterprises is presented in Figure 1.

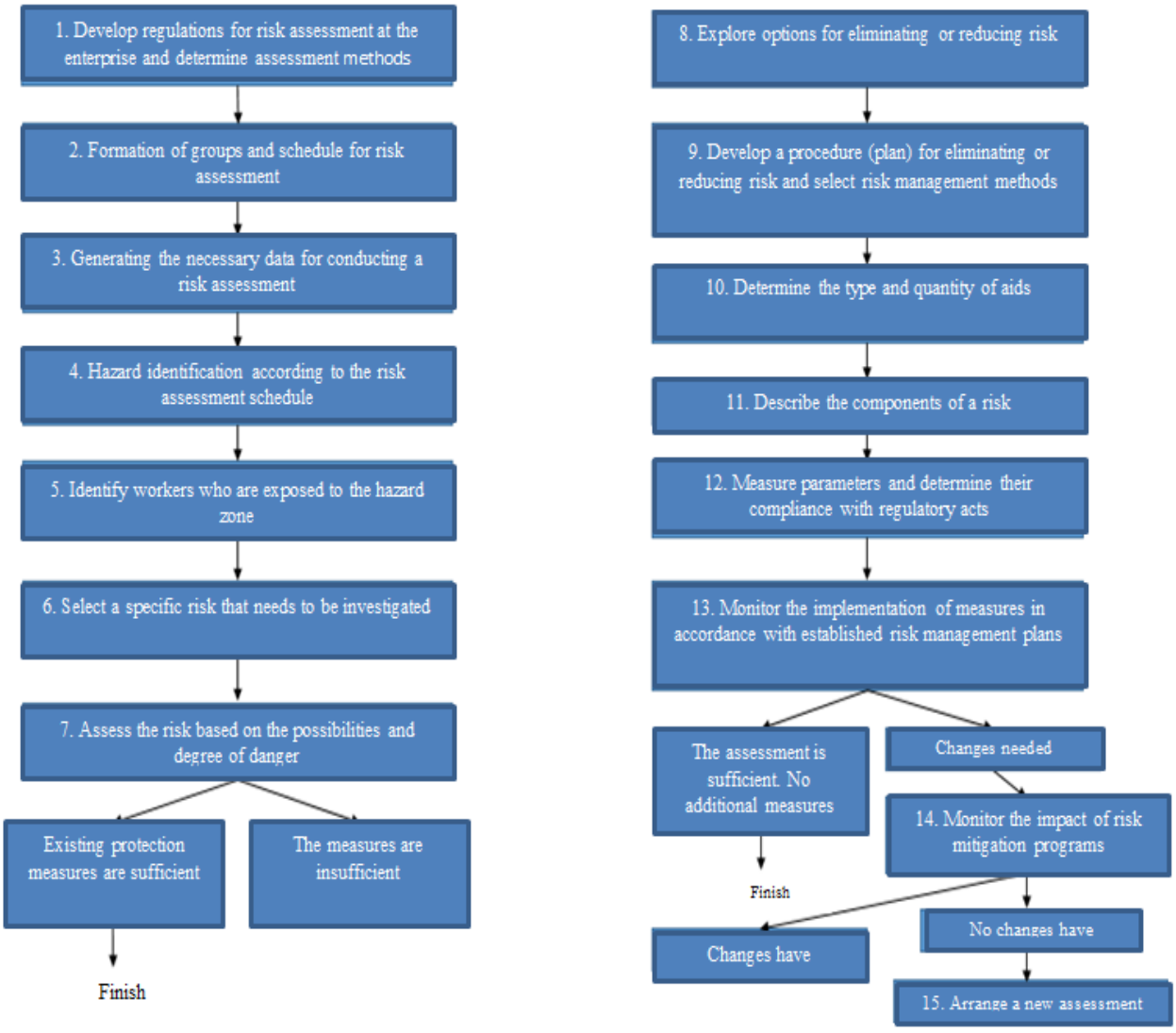


Figure 1 – Stages of risk assessment and management at transport enterprises

Рисунок 1 – Етапи оцінки та управління ризиками на транспортних підприємствах

Hazard identification, assessment and management of occupational risks is based on the "consequence/probability matrix" method in accordance with DSTU IEC/ISO 31010 [12].

The obtained results of occupational risk assessment are recommended to be used:

– during training and instructions on occupational safety, internship (duplication) of employees to inform the latter about the results of occupational risk assessment at their workplaces;

– during the preparation of technological maps;

– in work performance projects;

– in occupational safety instructions or instructions for the operation of equipment, facilities, devices, etc.;

– during the preparation of production plans and occupational safety work plans;

– planning measures to improve working conditions (making changes to technological processes, replacing equipment, etc.);

– during the analysis of the causes of accidents at work [13].

For each identified hazard, an assessment of the occupational risk that this hazard poses to workers is carried out.

The "consequence/probability matrix" method is used to assess occupational risks. According to this method, for an identified hazard, the following is determined:

– probability of occurrence of the hazard (P);

– severity of the consequences of the hazard (S) on the worker;

– magnitude of the occupational risk (R) from the hazard;

– significance category of the occupational risk posed by this hazard.

The probability of occurrence of a hazard (P) is determined by one of two methods:

- if there is information about the frequency of its impact on employees (statistics of occupational injuries of the unit) regarding the identified hazard, then the probability (P) is determined according to Table 1:

Table 1 – Assessment of Hazard Occurrence Probability (P) Using Quantitative Indicators

Таблиця 1 – Оцінка ймовірності виникнення небезпеки (P) за допомогою кількісних показників

Probability of danger		*Number of occupational injuries resulting from exposure to identified hazards on workers*
Value P, points	*probability notation*	
1	minimal	0 in the last 5 years
2	moderate	1-2 in the last 5 years
3	significant	3 in the last 5 years
4	significant	4-5 in the last 5 years
5	very high	more than 5 in the last 5 years

- if there is no information regarding the frequency of its impact on workers for the identified hazard, then the probability (P) is determined subjectively, based on one's own experience and taking into account Table 2:

Table 2 – Assessment of Hazard Occurrence Probability (P) Using Qualitative Indicators

Таблиця 2 – Оцінка ймовірності виникнення небезпеки (P) за допомогою якісних показників

Probability of danger		*Qualitative characteristics of the occurrence of danger*
Value P, points	*probability notation*	
1	minimal	The probability of the hazard occurring is insignificant (under existing production conditions, an incident with consequences is unlikely to occur).
2	moderate	The probability of a hazard occurring remains low (under existing production conditions, the occurrence of an incident with consequences is at a low level).
3	significant	The probability of the hazard occurring is at an average level (under existing production conditions, an incident with consequences may occur suddenly).
4	significant	The probability of the hazard occurring is high (under existing production conditions, an incident with consequences is likely to occur).
5	very high	The probability of a hazard occurring remains very high (under existing production conditions, an incident with consequences will definitely occur).

To determine the probability of occurrence of a hazard (P), preference should be given to the method based on quantitative characteristics (Table 2).

The severity of the consequences of the identified hazard on workers (S) is determined according to Table 3.

Table 3 – Assessment of the Severity of Consequences of a Hazard

Таблиця 3 – Оцінка тяжкості наслідків небезпеки

Consequences of exposure to danger		*Description of possible consequences of the hazard*
value S, points	*severity designation*	
1	minimal	case without loss of work capacity
2	moderate	accident with "short-term" loss of ability to work (up to 15 days inclusive)
3	significant	- accident with "long-term" loss of working capacity (more than 15 days); - case of occupational disease of an employee;
4	substantive	- accident with a disabling consequence; - group accident without a fatal consequence; - group case of an occupational disease without serious or fatal consequences
5	catastrophic	- fatal accident; - group accident, including one fatal accident; - case of occupational disease resulting in serious or fatal consequences

When determining the severity of the consequences of a hazard (S), it is necessary to take into account:

– the amount of potential harm to the employee (significant or insignificant);

– human consequences (number of people who may be affected);

– the ability of the hazard to recur or its absence (a one-time manifestation of the hazard or the hazard has the property of being repeated);

– the duration of the hazard exposure (short-term or long-term).

Based on the results of determining the probability of occurrence of the hazard (P) and the severity of the consequences of its impact (S), the value of the occupational risk (R) carried by this identified hazard is calculated [14]:

$$R = P \times S\,, \tag{1}$$

where R – professional risk value, points;

P – probability of danger occurrence, points;

S – severity of the consequences of the hazard, points.

Based on the result of calculating the value of the occupational risk (R), using the matrix of consequences/probabilities (table 4), the significance category of the obtained occupational risk is determined (table 5):

– low occupational risks (R = 1..5);

– moderate occupational risks (R = 6..12);

– significant occupational risks (R = 13..25).

Table 4 – Consequences–Probability Matrix (Occupational Risk Value (R))

Таблиця 4 – Матриця наслідків та ймовірностей (значення професійного ризику (R))

Probability of occurrence of hazard (*P*) / Severity of the consequence of the hazard (*S*)	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

Table 5 – Categories of Occupational Risk Levels
Таблиця 4 – Категорії рівнів професійного ризику

Color coding of occupational risk significance categories and corresponding occupational risk values (R)	*Name of the category of significance of occupational risks*	*Description of the significance category of occupational risks*
1..5	low occupational risks	- occupational risks that do not pose a potential threat to the life or health of the worker; - occupational risks are considered "acceptable"; - it is sufficient to warn the worker about the presence of occupational risks that pose a danger
6..12	moderate occupational risks	- occupational risks that pose a potential threat to the life or health of the employee; - occupational risks are considered "acceptable provided" simple measures are taken to manage them (warning signs, fencing, use of PPE); - occupational risks require constant monitoring and analysis
13..25	significant occupational risks	- occupational risks that pose a threat to the life or health of the worker; - occupational risks are considered "unacceptable"; - work is not permitted until the management of occupational risks has made the work and workers safe

Based on the results of the occupational risk assessment, the relevant information is entered into the occupational risk card, namely:

– probability of occurrence of danger (P) in points;
– severity of consequences of exposure to danger (S), in points;
– magnitude of occupational risk (R), in points;
– category of significance of occupational risk (low/moderate/significant occupational risk).

After assessing the occupational risk and determining its significance category, occupational risk management is carried out (selection and implementation of appropriate measures) in order to reduce the significance category of this risk.

First of all, significant and moderate occupational risks require management. Occupational risk management is implemented by:

– changing the probability of occurrence of the hazard (P);
– changing the severity of the consequences of the hazard (S);
– simultaneously changing the probability of occurrence (P) and the severity of the consequences of the hazard (S).

When choosing measures for occupational risk management, it is necessary to strive to reduce the magnitude of the occupational risk (R) taking into account the following hierarchy (from more effective measures to moderate):

– complete elimination of the hazard: replacement of hazardous equipment (equipment, devices, etc.) with safe ones; replacement of harmful materials with harmless ones; change of work technology, in order to eliminate a certain hazard;

– reduction of the magnitude of the occupational risk from the hazard: making changes to the technological process (use of less harmful materials, reduction of voltage level; replacement of equipment,

equipment with one that has a lower level of danger, harmfulness); replacement of the existing hazard with another, with a reduced level of significance category;

– prevention of employee contact with the hazard: removal of the employee from the zone where the hazard is present or application of appropriate technical solutions (installation of ventilation, fencing, insulation);

– application of safe work performance systems: use of a system for visualizing information about hazards (safety signs and markings, warning posters); conducting training and briefings on labor protection issues; conducting internships (duplication); application of a system of work permits (orders) for work associated with occupational risks; monitoring the condition of equipment, etc.;

– application of protective equipment: use of collective and individual protective equipment [15].

Occupational risk management measures that require additional actions from the employee are less reliable than those that are carried out without his participation. For example, warning an employee about the prohibition of entering the danger zone is a less effective measure than fencing off the dangerous place, as a result of which the employee's access to the danger will be blocked.

If several occupational risk management measures are identified, then the most effective among them can be assessed according to the following criteria:

– by the magnitude of the change in the level of danger: the more the value of the occupational risk is reduced, the more effective the measure will be;

– the area of impact of the measure: the more occupational risks are affected by the measure or the safety of the more people it has an impact on, the more effective this measure will be;

– compliance with safety standards: if the measure will bring the conditions and safety of work into compliance with the requirements of regulatory legal acts on labor protection, this measure must be applied;

– effectiveness of the measure and costs: a measure that ensures the reduction of occupational risk to an acceptable level at moderate costs is considered more effective than a measure to completely eliminate the hazard through significant financial (material) costs or a complete change in production technology.

After determining the measures for managing occupational risk, it is necessary to enter the relevant information into the occupational risk card, namely:

– information on the identified measures for managing occupational risk;

– the position of the person supervising the implementation of the measures;

– the deadline/terms for implementing the measures (if necessary).

To implement occupational risk management measures, it is necessary to plan their implementation, for which:

– identify measures that require priority resolution;

– if there are several measures to resolve one issue, choose the optimal one in terms of occupational risk management and the costs (resources) required for this;

– determine the sequence of implementation of measures;

– identify measures that must be implemented simultaneously;

– analyze how to minimize the damage that the measures being implemented may cause;

– determine the consequences that are expected in case of failure to implement the measures.

First of all, occupational risk management measures provided for by state regulatory legal acts on labor protection are determined and implemented.

Then, additional measures are determined and implemented to increase the level of labor safety of employees.

Such measures should be implemented depending on their complexity, financial and resource costs. To implement additional measures, an appropriate program may be developed and approved by the management of the unit.

Based on the results of determining occupational risk management measures, relevant information about these measures is entered into the occupational risk card.

Based on the results of occupational risk management, all hazards that constitute significant occupational risks must be eliminated and the re-assessment of occupational risks from these hazards must constitute "moderate" or "low" occupational risks.

If, as a result of occupational risk management, the identified hazard continues to pose a significant occupational risk, it is not permitted to carry out work or work at workplaces that have such sources of danger.

After conducting an initial assessment of occupational risks at the enterprise, it is necessary to continuously monitor them in order to:

– update data on identified hazards and the magnitude of occupational risks (R) from them;

– verify the effectiveness of measures taken to manage existing occupational risks and, if necessary, revise these measures;

– identify new hazards.

Monitoring of hazards and risks from them should be carried out by conducting:

– reassessment of occupational risks in the event of changes in: technological processes; equipment (equipment, tools) used during the performance of work; materials used; requirements of regulatory legal acts on labor protection, etc. Re-assessment of occupational risks is carried out before the start of work;

– inspections of the state of labor protection at workplaces or during the performance of certain works;

– analysis of the causes of industrial injuries in the unit;

– assessment of occupational risks upon the employee's request regarding the presence of a danger to his life or health during the performance of work or at the workplace;

– extraordinary assessment of occupational risks on the initiative of: management or an employee of the unit, a person who conducts an inspection of the state of labor protection in the unit.

Based on the monitoring results, if necessary, the previously defined occupational risk management measures are adjusted, and the relevant information in the Occupational Risk Card and the Occupational Risk Register is updated.

Given the dynamic development of technologies and the increasing requirements for the efficiency of management decisions, there is a need to implement digital approaches to risk management that ensure their continuous monitoring and adaptation. Current trends in the development of the transport industry indicate the need to implement intelligent risk monitoring systems. It is advisable to use digital tools that provide operational collection, analysis and visualization of data on workplace hazards.

In particular, the use of Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) technologies allows you to detect potential deviations in real time, predict the occurrence of emergency situations and generate automated signals to management services. The implementation of an integrated digital platform for occupational safety management (IDP-OP) allows you to combine data from various sources: environmental sensors, transport control systems, medical indicators of employees, etc. This increases the accuracy of risk assessment, ensures the preventive nature of management decisions and forms a safety culture at the enterprise. The developed model of the integrated occupational risk management system (MISUR) is designed to combine traditional principles of occupational safety with the capabilities of modern digital technologies. It reflects the relationship between risk assessment, management and monitoring in the continuous improvement cycle (PDCA) [14].

The planning stage (Plan) involves identifying hazards, determining the probability of their occurrence, predicting consequences, and developing risk management strategies. The implementation (Do) stage involves implementing planned safety measures, training personnel, technical modernization, and digital monitoring. The verification stage (Check) involves assessing the effectiveness of the measures taken, analyzing the results, identifying deviations and residual risks. The final corrective action stage (Act) is aimed at updating the occupational health and safety policy, adjusting safety programs, and improving risk management procedures [15].

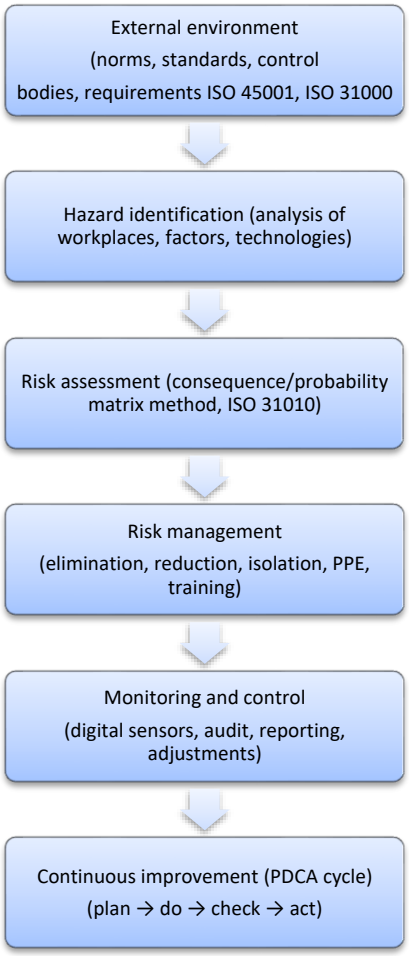


Figure 2 – Model of the integrated occupational risk management system (MISUR)
Figure 2 – Модель інтегрованої системи управління професійними ризиками (MISUR)

A feature of the MISUR model is its integration with digital technologies, which provide continuous feedback between all stages of the PDCA cycle (Figure 2). This allows you to create an adaptive system that can quickly respond to changes in the production environment, maintain a high level of safety culture and make management decisions based on objective data. Thus, the MISUR model forms a holistic and flexible risk management mechanism that meets modern trends in the development of the transport industry and the digital economy.

Therefore, the introduction of digital technologies into the occupational health and safety management system opens up new opportunities for forecasting, controlling and preventing occupational hazards. The use of the integrated MISUR model ensures the consistency and continuity of risk management processes, contributes to the formation of a proactive safety culture and increases the competitiveness of transport enterprises in modern conditions of the development of the digital economy.

Conclusions. The study proves that effective occupational risk management is a key factor in ensuring occupational safety at transport enterprises. The proposed integrated approach to risk assessment and reduction, built on the principles of international standards ISO 31000 and ISO 45001, allows for a systematic combination of the processes of hazard identification, their quantitative assessment and the implementation of preventive measures.

The use of the "consequence/probability matrix" methods provides the ability to clearly determine the level of significance of each risk, which is the basis for making informed management decisions. The use of modern digital technologies - such as artificial intelligence, data analytics, IoT-based monitoring systems - opens up new opportunities for hazard prediction, optimization of control and increasing the accuracy of risk assessment in real time.

The developed model of the integrated occupational risk management system (MISUR) demonstrates the relationship between risk assessment, management and monitoring in the continuous improvement cycle (PDCA). Its practical implementation will contribute to improving safety culture, reducing occupational injuries, forming a proactive approach to occupational safety, and ensuring sustainable development of transport enterprises in Ukraine.

Thus, the proposed approach is not only theoretically sound, but also has significant potential for practical application in occupational safety management systems in the transport industry in the context of digital transformation.

Refernces

1. Tsopa V. A., Cheberiachko S. I., Yavorska O. O., Nehrii T. O., Tkachenko T. M., Deryuhin O. V. Osoblyvosti otsinky profesiinykh ryzykiv u vantazhnykh perevezenniakh. *Ekonomichna stratehiia i perspektyvy rozvytku sfery torhivli ta posluh*, 2023. № 1 (37). S. 45–56.

2. Tsopa V., Nehrii T., Cheberiachko S., Litvinova Y., Deryugin O., Horoshko N. Improving the risk assessment process of road accidents involving trucks. *Transactions on Transport Sciences*, 2024. Vol. 15, No. 3. P. 1–15.

3. Hohitashvili H. H., Stepanyshyn V. M. Suchasni metody upravlinnia ryzykamy u sferi okhorony pratsi. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini*, 2021. Vyp. 39. S. 27–34.

4. Bochkovskyi A. P., Tretiakov O. V. Upravlinnia ryzykamy vyrobnychykh nebezpek na pidpryiemstvakh transportu. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 2020. Vyp. 3 (47). S. 112–118.

5. Tretiakov O. V., Bochkovskyi A. P. Integrated risk management in occupational safety systems of transport enterprises. *Safety in Technosphere*, 2023. Vol. 32, No. 1. P. 44–53.

6. Tewari A., Paiva A. R. Modeling and mitigation of occupational safety risks in dynamic industrial environments. *arXiv preprint*, arXiv:2205.00894, 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2205.00894

7. Halil V. V., Zdanovskyi V. H. Risk management in occupational safety systems of industrial enterprises. *Journal of Engineering Sciences*, 2019. Vol. 6, No. 2. P. 35–42.

8. Chen J., Zhang Y. A dynamic risk evaluation model for occupational safety in transportation enterprises. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2021. Vol. 27, No. 4. P. 895–907.

9. Ismael S., Abo-Sinna M. Risk assessment approaches for occupational safety in industrial systems. *Safety Science*, 2020. Vol. 130. P. 104–115.

10. Zakon Ukrainy «Pro okhoronu pratsi», URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12

11. Proekt Zakonu Ukrainy «Pro systemu upravlinnia ryzykamy u sferi okhorony pratsi». URL: https://zakon.rada.gov.ua

12. DSTU IES/ISO 31010:2013 *Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku* (IES/ISO 31010:2009, IDT).

13. Melnychenko O. I., Kharuta V. S., Sorochynska O. L., Kulbovskyi I. I. Upravlinnia ryzykamy vyrobnychykh protsesiv vidpovidno do standartu ISO 3100:2018 v proektakh transportnoi infrastruktury. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo: naukovyi zhurnal*, Vyp. 116.1. Kyiv, 2024. S. 195–205. DOI: https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-116.1-195-205

14. DSTU ISO 45001:2019 *Systemy upravlinnia okhoronoiu zdorovia ta bezpekoiu pratsi. Vymohy ta nastanovy shchodo zastosuvannia* (ISO 45001:2018, IDT).

15. Melnichenko O.I. Implementation of international standards for labor safety and risk management and ways to improve them in transport enterprises / O.I. Melnichenko, O.Л. Sorochynska, I.I. Kulbovsky // Bulletin of the National Transport University. Series "Technical Sciences". Scientific and technical collection. - Kyiv: National Transport University, 2021. - Issue 1 (47).

ІНТЕГРОВАНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКІВ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ

Харута Віталій Сергійович., кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри Виробництво, проректор з навчальної роботи, e-mail: kharuta_vitaliy@ukr.net, тел. +38(096)4719517, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0000-0002-8897-7558

Сорочинська Олена Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри «Екологія та безпека життя», e-mail: o.sorochynska@ntu.edu.ua, тел. +38(067)7626178, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0000-0003-2477-1275

Кульбовський Іван Іванович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту», e-mail: kulbovskiy@ukr.net, тел. +38(067)9305928, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0000-0002-5359-3842

Старук Олександр Сергійович, аспірант, Національний транспортний університет, e-mail: oleksandr.staruk@gmail.com, тел. +38(067)506-51-25, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0009-0004-9475-2592

Анотація У статті проаналізовано сучасні підходи до управління охороною праці на транспортних підприємствах України з урахуванням останніх технологічних викликів, ризиків та міжнародних стандартів. Дослідження обґрунтовує необхідність систематичної ідентифікації та оцінки професійних ризиків, що виникають у виробничих процесах транспортних підприємств, а також розробки превентивних та коригувальних заходів на основі принципів стандартів ISO 31000 та ISO 45001.

Особливий акцент робиться на впровадженні цифрових інструментів та інтелектуальних систем моніторингу, що дозволяють в режимі реального часу виявляти та прогнозувати потенційні небезпеки. У статті пропонується впровадження інтегрованої цифрової платформи управління охороною праці (IDP-OS) та представлено модель інтегрованої системи управління професійними ризиками (MISUR), яка поєднує класичні та цифрові підходи до управління ризиками в рамках циклу постійного вдосконалення PDCA (Plan–Do–Check–Act).

Об'єктом дослідження є міжнародні стандарти та методологічні підходи до систем управління професійними ризиками.

Метою дослідження є аналіз та розробка інтегрованої моделі управління професійною безпекою, орієнтованої на ризики, відповідно до міжнародних стандартів для підвищення культури безпеки та забезпечення сталого розвитку транспортних підприємств.

Методи дослідження – аналітичний, порівняльний, системний.

Результати дослідження можуть бути рекомендовані для впровадження в системах управління охороною праці українських транспортних підприємств з метою поліпшення прогнозування ризиків, зменшення виробничого травматизму та підвищення ефективності діяльності.

Ключові слова: управління, орієнтоване на ризики, охорона праці, транспорт, безпека праці, виробничий процес, модель, методологія, цифрові технології, ідентифікація, оптимізація

УДК 629.3
UDC 629.3

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-230-236

ІННОВАЦІЇ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАРЯДНИХ РОЗ'ЄМІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ У СУЧАСНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

INNOVATIONS AND DESIGN FEATURES OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING CONNECTORS IN CONTEMPORARY TRANSPORT SYSTEMS



***Дудко Андрій Юрійович**, аспірант, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e- mail: ad0980171842@gmail.com,*

https://orcid.org/0000-0002-4902-4471



***Кузьмінець Микола Петрович,** доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну.*
e-mail: kuzminecmp@ukr.net

https://orcid.org/0000-0002-9636-919X



***Разбойніков Олександр Олександрович,** кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: razboyn1k@ukr.net*

https://orcid.org/0000-0003-3024-0999

Анотація. У статті досліджено сучасні зарядні роз'єми для електромобілів із акцентом на їхні інноваційні конструктивні особливості та вплив на безпеку та ефективність заряджання. Проаналізовано ключові типи роз'ємів з урахуванням типу струму, рівнів заряджання та регіональних стандартів. Окрему увагу приділено українській термінології електромобільності. Узагальнено сучасні тенденції розвитку інфраструктури електротранспорту та підкреслено важливість технічної стандартизації та послідовного вживання термінів для ефективного впровадження електромобілів. Крім того, досліджено взаємозв'язок розвитку роз'ємів із глобальними політичними ініціативами,

такими як Європейський зелений курс та Регламент щодо інфраструктури для альтернативних видів палива (AFIR), що підтверджує наукову та практичну актуальність теми..

Ключові слова: електромобіль, гібридний автомобіль, рекуперативне гальмування, MPGe, WLTP, конектор.

Вступ. Електромобілі все частіше з'являються на дорогах України та світу і вочевидь вони є автомобілями майбутнього. Вже сьогодні такі транспортні засоби використовуються та випускаються як масове виробництво. Електромобіль це загальний термін для різних авто, які рухаються завдяки акумуляторним батареям. Електромобіль (EV) зазвичай належить до будь-якого транспортного засобу, який частково або повністю живиться від електричної батареї, яку можна безпосередньо підключити до мережі [1]. Електричні транспортні засоби забезпечують значні переваги, серед них: екологічність та економічність, зручність та комфортність, простота та зменшення маси, підвищена ефективність в цілому. Взамін двигуна внутрішнього згоряння з багатьма системами (паливоподачі, запалювання, охолодження, вихлопу та інші) та відповідно їхніх конструктивних елементів на електромобілі встановлено електродвигун, який працює від електричної енергії, що накопичена в акумуляторі. Все більше світових автовиробників поетапно відмовляються від виробництва автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння та переходять на випуск електричних транспортних засобів.

Важливим елементом електромобіля є зарядні роз'єми, адже від них залежить ефективність, швидкість та безпечність підзарядки електромобілів.

Оскільки у наш час відбувається масове застосування електромобілів тож не маловажливим фактором є узгодження та стандартизоване використання термінів, які містять компонент «електро», чому також буде приділено увагу у даній статті.

Матеріали та методи. Дослідження проведено шляхом комплексного інформаційно-пошукового аналізу наукової та технічної літератури. Було систематично переглянуто джерела, присвячені конструктивним та технічним рішенням зарядних роз'ємів для електромобілів, а також роботи, що розглядають українську термінологію, пов'язану з експлуатацією електротранспорту. З метою підвищення об'єктивності аналізу джерела відбиралися за такими критеріями: 1) наявність у міжнародних наукових базах даних; 2) орієнтація на технічні рішення для роз'ємів; 3) період публікацій, що переважно охоплює 2010–2024 роки. Такий підхід дозволив систематизувати як фундаментальні, так і прикладні результати досліджень. Попередні дослідження з електромобільності, зокрема щодо зарядних роз'ємів, проводили Гордієнко Д.А., Петришак П.В. та Колесніков В.О. Дослідження, присвячені термінології, внесли Самсонкін В.М., Шиш В.О., Мироненко В.К., Торопов В.І., Пацера Л.В. та Ктитарова Н.

Мета роботи полягає у визначенні особливостей сучасних зарядних роз'ємів електромобілів, їх безпеки та ефективності, а також узгодження термінології українською мовою функціональних елементів експлуатації електромобілів шляхом аналізу інформаційних джерел.

Виклад основного матеріалу. З появою у світі електрокарів з'явилося багато нової термінології, а з рекламних текстів часом важко розібратися про що йде мова. В роботі наведено опис деяких термінів, що використовують в інформаційних джерелах з поясненням.

Гібрид – означає комбінацію бензинового та електричного двигунів, встановлених на автотранспортному засобі [1]. Бензиновий двигун працює традиційно на бензині, а електричний двигун від вбудованої батареї, яка заряджається від двигуна внутрішнього згоряння, рекуперативного гальмування або зовнішньої зарядки [2].

Не всі гібриди однакові. Більшість потрапляє під категорію «Mild hybrid» (м'який гібрид), що означає те, що електромотор тільки допомагає основному бензиновому і використовувати його як

тяговий неможливо. «Plug-in hybrid» (гібрид, що підключається) зазвичай іменується, як «PHEV» та дозволяє їздити обмежений час тільки на електричному моторі, завдяки більш потужному мотору і батареї. Зазвичай такі гібриди можуть проїхати 30-80 км на електричній тязі [3].

Рекуперативне гальмування – це коли електродвигун під час руху, в режимі гальмування транспортного засобу відключається від живлення від батареї і переходить у режим роботи генератора, тобто починає сам виробляти струм [5]. Таким чином, електродвигун одночасно бере участь у гальмуванні автомобіля і заряджає вбудовану батарею.

Electrified (електрифікований) – під цю категорію потрапляють всі транспортні засоби з електричною тягою: електромобілі, гібриди, а також автомобілі на водневих елементах (наприклад, Honda Clarity) [3].

EV (Electric vehicle) або BEV (Battery Electric vehicle) – це автомобіль без двигуна внутрішнього згоряння, що працює виключно на електродвигуні і потужній батареї [2].

WLTP (World harmonized Light-duty vehicles Test Procedure) - це всесвітньо узгоджена процедура випробувань легкових автомобілів, яка ініціює єдину в світовому масштабі методику випробувань для визначення витрати палива і викидів вихлопних газів [1].

До основних показників параметрів електромобілів належить потужність, яка, відповідно до системи СІ вимірюється в кіловатах (кВт, kW), однак може вказуватися аналогія до кінських сил двигунів внутрішнього згоряння, шляхом застосування коефіцієнту 1.34 [3].

Кіловат-година (кВт·год) (kWh) – це аналог одиниці витрати палива бензинового двигуна (наприклад, 1 літр пального), тільки для електричного автомобіля [6].

Інколи розрахунок економічності електричного автомобіля проводиться в тих же одиницях що і економічність автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння – в кількості миль, які може проїхати автомобільний транспортний засіб на одному галоні палива (MPG - miles per gallon). У MPGe індекс «е» означає приналежність до електричних авто. Однак, більш високі значення MPGe не обов'язково означають що у автомобіля більший запас ходу [2].



Рисунок 1 – конектор типу SAE J1772
Figure 1 – SAE J1772 connector

Особливості зарядних конекторів. Для заряджання електричних батарей електромобіля використовують конектори. Конектор – це електромеханічний пристрій для роз'ємного з'єднання електричних провідників [4]. Зарядні конектори є ключовим елементом інфраструктури електротранспорту, який впливає на його ефективність, безпеку та доступність. Стандартизація та технологічний розвиток зарядних систем сприяють популяризації електромобілів та поліпшенню їх експлуатаційних характеристик.

Зарядні конектори класифікуються за такими критеріями:

Тип струму: змінний (AC) та постійний (DC);

Регіональна стандартизація: європейські, північноамериканські, азіатські стандарти;
Рівень зарядки: повільна, прискорена, швидка зарядка.
Основні типи конекторів:

Відомий як *«J-plug» конектор J1772* (рис. 1) використовується для зарядки електромобілів до 240В (іноді називається «Level 2»). J1772 несумісний з швидкою зарядкою, але в цілому досить популярний. Наприклад, такий конектор використовують для зарядки електромобілів Nissan Leaf [4].

Конектор типу *CCS (Combined Charging System)* (рис. 2) є відгалуженням J1772. Він поєднує зарядку змінним (AC) і постійним (DC) струмом в одному роз'ємі. [4]. Така технологія пропонує всім власникам електрокарів користуватися єдиним зарядним гніздом для всіх методів заряду. Використовується такими автовиробниками, як Volkswagen, BMW, Ford, Mercedes-Benz та інші.



Рисунок 2 – конектор типу CCS
Figure 2 – CCS connector

Назва роз'єму *CHAdeMO* (рис. 3) застосована від японської фрази *ocha demo ikagadesu ka*, що перекладається як «не хочете чаю?». Назва як би натякає що зарядка таким роз'ємом займе часу не більше ніж пиття чаю. В основному зустрічається в японських і корейських авто. Також підтримує швидку зарядку [4].



Рисунок 3 – конектор типу CHAdeMO
Figure 3 – CHAdeMO connector

Mennekes (або *IEC 62196*) (рис. 4) є популярним типом зарядного роз'єму у європейських виробників електромобілів [4]. Застосовується для зарядки змінним струмом. Може підтримувати як AC-зарядку, так і DC-зарядку при інтеграції з CCS2. Багато зарядних станцій підтримують Mennekes (Type 2) без перехідників.



Рисунок 4 – конектор типу Mennekes
Figure 4 – Mennekes connector

Table 1 – Comparative characteristics of the main EV charging connectors
Таблиця 1 – Порівняльні характеристики основних роз'ємів для зарядки електромобілів

Тип роз'єму	Типовий діапазон потужності	Регіон застосування	Переваги	Обмеження/ виклики
SAE J1772 (Type 1)	До 19 кВт (AC, Level 1–2)	Північна Америка, Японія	Простий дизайн, поширений для домашньої та громадської зарядки змінним струмом	Не підтримує швидку зарядку постійним струмом, обмежений переважно США та Японією
CCS (Combined Charging System, CCS1/CCS2)	До 350 кВт (AC + DC)	Північна Америка (CCS1), Європа (CCS2), дедалі більше глобально	Універсальний (AC/DC в одному порту), широка підтримка виробників авто, ультра-швидка зарядка	Різні версії (CCS1 vs CCS2) ускладнюють глобальну уніфікацію
CHAdeMO	До 200 кВт (DC, деякі оновлення до 400 кВт)	Японія, Південна Корея, частково Європа	Стабільний протокол, сильна підтримка швидкої зарядки, двостороння підтримка V2G	Поступове витіснення CCS у Європі/США, обмежена підтримка виробників авто
Mennekes (IEC 62196 Type 2)	До 43 кВт (AC); з CCS2 – до 350 кВт (DC)	Європа (стандарт ЄС), частково Азія	Стандартизація ЄС, сумісність з CCS2, широко доступний	Лише AC без інтеграції CCS2, потрібні адаптери поза межами ЄС
Tesla connector	До 250 кВт (DC, мережа Supercharger)	США (оригінальний дизайн), зараз перехід на стандарт NACS; в ЄС – модифікований Тип 2	Дуже велика потужність, безшовна інтеграція з Supercharger, компактний дизайн	Обмежений мережею Tesla, перехід у США на NACS може зменшити глобальне поширення

Оригінальний конектор від *Tesla*, розроблений на основі *IEC 62196 Type 2*. Серед переваг: висока потужність зарядки – підтримує до 250 кВт; простота використання – автопідключення до Supercharger без необхідності автентифікації через картки чи додатки; відсутність окремих контактів для AC/DC – один порт використовується і для змінного, і для постійного струму, що спрощує конструкцію. Використовується тільки в фірмовій мережі зарядок Tesla Supercharger [4].



Рисунок 5 **–** конектор Тесла
Figure 5 **–** Tesla connector

Основні типи роз'ємів можна класифікувати за критеріями потужності, регіонального застосування та перспектив розвитку. Такий порівняльний підхід дозволяє визначити як переваги, так і притаманні кожному стандарту обмеження (табл. 1).

Висновки. На основі аналізу джерел інформації щодо української термінології основних функціональних елементів електромобілів у статті надано детальний огляд ключових понять, а також основних показників і параметрів експлуатації електромобілів. Дослідження також розглядає основні типи зарядних роз’ємів, висвітлюючи їхні характеристики та експлуатаційні особливості.

У подальших дослідженнях планується зосередитися на конструкції та функціональності основних компонентів електромобілів. Крім того, очікується, що нові технології, зокрема бездротове заряджання та інтеграція «vehicle-to-grid» (V2G), відіграватимуть дедалі значнішу роль у розвитку електромобільності.

Перелік посилань

1. Державний стандарт України. Засоби транспортні дорожні. Типи. Терміни та визначення ДСТУ 2984-95

2. Словник основних транспортних і суміжних термінів / Уклад. Б.І. Торопов. — К.: Державний економіко-технологічний університет транспорту, НВО ГІПРОТРАНС, 2013. — 200 с.

3. Кочан І. Слова з компонентом електро- в сучасній українській літературній мові / Ірина Кочан // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Серія «Проблеми української термінології». – 2018. – № 890. – С. 55–61.

4. Азарова Л. Є. Словотвірний потенціал компонентів іншомовного походження у творенні композитних науково-технічних термінів [Електронний ресурс] / Л. Є. Азарова, Г. В. Кухарчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 2. – С. 28–31.

5. Великий тлумачний словник сучасної української мови / укл. В. Т. Бусел. – К. ; Ірпінь : ВТФ «Перун», 2001. – 1440 с.

6. Етимологічний словник української мови : у 7 т. / за ред. О. Мельничука. – К. : Наук. думка, 1982. – 2003. – Т. 1–4.

INNOVATIONS AND DESIGN FEATURES OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING CONNECTORS IN CONTEMPORARY TRANSPORT SYSTEMS

Dudko Andriy Yu., postgraduate student, scientific specialty 274 «Automobile transport» National Transport University, e-mail: ad0980171842@gmail.com, tel. +380636465268, Ukraine, 01010, Kyiv, M.Omelyanovicha-Pavlenko St. 1, http://orcid.org/0000-0002-4902-4471

Kuzminets Mykola P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer, Engineering Graphics and Design, National Transport University, e-mail: kuzminecmp@ukr.net, tel. +380983600812, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovicha-Pavlenko St. 1, https://orcid.org/0000-0002-9636-919X

Razboynikov Oleksandr O., PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobiles, National Transport University, e-mail: razboyn1k@ukr.net, tel.:+380972214790, https://orcid.org/0000-0003-3024-0999.

Summary. The article investigates the innovative aspects and design principles of electric vehicle charging connectors within modern transport systems. Attention is given to the role of connectors as critical components that determine the efficiency, safety, and accessibility of the charging process. The research also addresses the importance of consistent terminology and technical standardization, which serve as key prerequisites for the sustainable development of electric transport infrastructure. By analyzing relevant literature and existing practices, the study highlights current trends in electromobility and outlines perspectives for further integration of electric vehicles into global and national transport networks.

Keywords: electric vehicle, hybrid vehicle, recovery braking, MPGe, WLTP, connector.

References

1. State Standard of Ukraine. Road Transport Vehicles.Types.Terms and Definitions DSTU 2984-95
2. Dictionary of basic transport and related terms / Compiled by B.I. Toropov. — K.: State Economic and Technological University of Transport, NGO GIPROTRANS, 2013. — 200 p.
3. Kochan I. Words with the component electro- in the modern Ukrainian literary language / Iryna Kochan // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series "Problems of Ukrainian Terminology". – 2018. – No. 890. – P. 55–61.
4. Azarova L. E. Word-forming potential of components of foreign origin in the creation of composite scientific and technical terms [Electronic resource] / L. E. Azarova, G. V. Kukharchuk // Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute. – 2011. – No. 2. – P. 28–31.
5. Large explanatory dictionary of the modern Ukrainian language / ed. V. T. Busel. – K. ; Irpin: VTF "Perun", 2001. – 1440 p.
6. Etymological dictionary of the Ukrainian language: in 7 v. / edited by O. Melnychuk. – K.: Nauk. Dumka, 1982. – 2003. – Vol. 1–4.

УДК 620.172.2.087.45
UDC 620.172.2.087.45

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-237-247

EQUIPMENT AND TOOLS TO INVESTIGATE THE SPATIAL FORCE LOAD OF COMPLEX MECHANICAL SYSTEMS

ОБЛАДНАННЯ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОГО СИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ СКЛАДНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ



Musiiko Volodymyr D., *Doctor of Science in Engineering, National Transport University, Head of the Department of Road Construction Machinery Engineering, e-mail: musvd48@gmail.com, +380501040262,*

https://orcid.org/0000-0001-9983-3296



Koval Andrii B.*, Candidate of Science in Engineering, National Transport University, Associate Professor, Department of the Department of Road Construction Machinery Engineering, e-mail: kandr6104@gmail.com, +380500240894,*

https://orcid.org/0000-0003-1295-8200



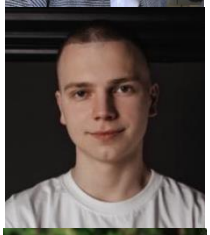
Nikolaienko Volodymyr A., *Candidate of Science in Engineering, National Transport University, Associate Professor, Department of the Department of Road Construction Machinery Engineering, e-mail: vanikolaienko@ukr.net, +380679786117,*

https://orcid.org/0000-0003-3983-0434



Horidko Nataliia M.*, Candidate of Science in Engineering, National Transport University, Acting Head of the Department of Foreign Philology and Translation, e-mail: natalia.horidko@ukr.net,*

https://orcid.org/0000-0002-9158-7163



Patsora Danulo I.*, master of Science, graduate student of the Department of Road Construction Machinery Engineering, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: dpatsora@gmail.com+380996460618,*

https://orcid.org/0000-0001-9515-3672



Dubinin Maksym S., *master of Science, graduate student of Department of the Department of Road Construction Machinery Engineering, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: maxmk1989@gmail.com, +380957055527,*

https://orcid.org/0009-0009-2140-5131

Abstract. The article examines the justification for designing and creating the equipment to determine the characteristics of spatial force loading on physical models of continuous earthmoving machinery actuators in real time when digging the soil. It also discusses measuring and registering tools for recording the parameters of force load when developing the soil.
Research objective: The creation of equipment and registering tools for determining the characteristics of spatial force load of complex mechanical systems.
Research object: Operating equipment of trenching and excavation continuous earthmoving machinery.
Research method: Experimental.

As a result of the conducted research, measuring equipment has been developed in the form of a strain gauge suspension for model structures of the studied operating equipment for trenching and excavation machinery. The equipment enables real-time measurement of the magnitudes and coordinates of applying spatial components of external forces and their moments to the studied mechanical system. Based on strain gauge measurements, determining the magnitudes of external forces and their moments is provided mathematically and by adding or subtracting electrical signals received from strain gauges of corresponding pairs of strain links.

A measuring and registering complex with a set of analog and discrete sensors has been developed to register actual loads applied to the studied operating equipment of earthmoving machinery. This complex enables measuring and registering the actual loads in the system with an accuracy of ± 5 % of the real value.

The complex enables to read and record the received information on a micro SD memory card, to convert the received signals into digital code, and store the received information (measurement results) on a digital medium for its further processing and analysis.

Key words: force, moment, mechanical system, strain measurement, earthmoving machinery, measuring complex, sensor, memory card, digital code, amplifier, strain gauge module

Problem statement and its topicality

Creation and ensuring the effective operation of complex mechanical systems with spatially variable in magnitude and time loading is a rather complicated mechanical task. It should be noted that the creation of these systems does not depend on their technological purpose. An essential condition for the creation of these systems is complete information about the extent, nature of the change in magnitude and time of external loads acting on the system created.

The information about external loads in the system is necessary not only for creating the mechanical system itself, but also for ensuring its operation, in other words, for creating a control system for the specified system.

External loads acting in the system are determined by calculation or experimentally. The calculation method does not always enable to determine the external loads, especially when the directions of the external forces components and the points of their application are uncertain.

As for obtaining the necessary information, testing the created systems on models, both mathematical and physical, has been promising recently [1, 2]. More complete and objective information about the loading of complex systems under the conditions of their real operation can be obtained due to experimental studies of physical models of complex mechanical systems. The example is continuous earthmoving machinery on their physical models.

The main requirement for performing such experimental studies is to ensure continuous measurements of the spatial components of external forces and the moments of action of these forces registering their magnitude, patterns of change in time due to changes in the design parameters of the system and its operating modes.

Regarding continuous earthmoving machinery, especially when its operating equipment is simultaneously moved along all three coordinate axes under the action of external loads, it should be noted that to perform the aforementioned studies the necessary equipment was not available and had to be created.

The analysis of published research results

Experimental determination of external loads on the system under study (or its physical model), as well as registering the coordinates of these loads application in time by the magnitude and nature of the action

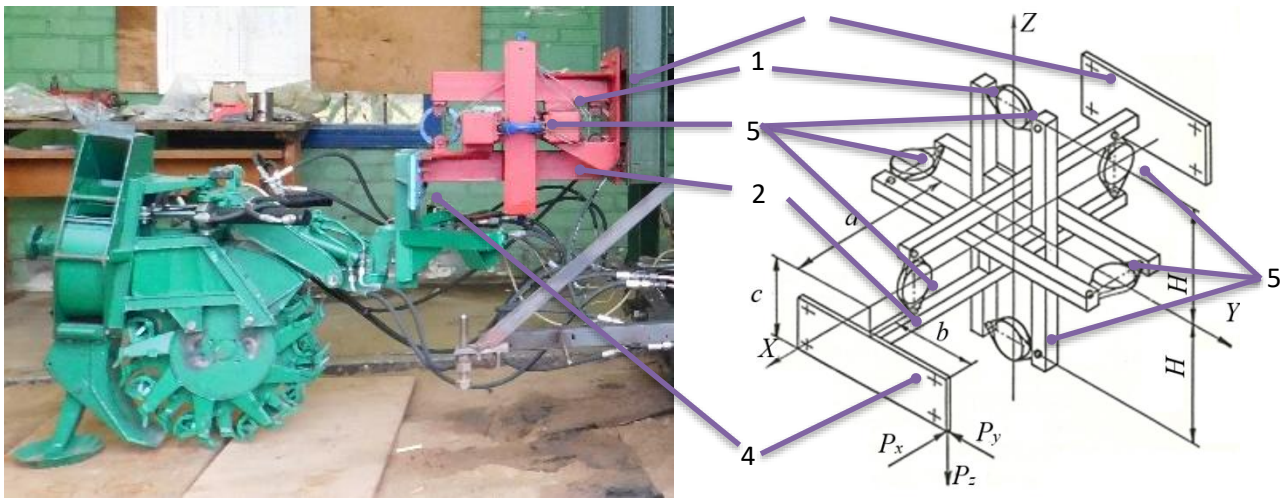
(static or dynamic loads) and the patterns of change is a rather complicated task. Currently, equipment designs [3-7] and apparatus are known to be used to perform this task. It should be specified that the equipment and measuring tools known to the authors cannot be used to solve the problem of experimentally determining external loads acting on the operating and running equipment of continuous earthmoving machinery (trench and ditch machines) for various reasons. As a rule, the existing equipment [8, 9] enables to determine the action of external forces in one plane which does not clarify the load of the object studied. Measuring equipment for registering the loads on each of the coordinates of the X, Y, Z axes separately does not enable to estimate the spatial load of the system as a whole at a fixed point of time with sufficient accuracy. The existing equipment for determining the spatial force load of machine metal structures, their operating and working equipment, and drives is quite bulky and massive. It is therefore difficult for practical use.

Besides, it should be noted the complexity of registering the external loads on complex mechanical systems, when these loads act simultaneously at many points of the system under study and require the actions both in magnitude and in nature to be registered simultaneously. Certain designs of measuring tools [10-13] do not enable to simultaneously register the action of external forces at many points of the system (there may be several dozen of them), which significantly reduces the informativeness of the performed studies. In order to improve this situation, a special cycle of work was carried out. It was aimed at determining the parameters of the spatial force load of complex mechanical systems and registering these parameters.

Task setting implies the creation of equipment for determining the characteristics of spatial force loading of actuator models for continuous earthmoving machinery (trench and ditch) when digging the soil in real time. Measuring and registering equipment for force load parameters is also to be created.

Presentation of the materials

The spatial force load characteristics for the model of the studied earthmoving machinery actuator when digging the soil in real time can be measured with a universal strain gauge suspension created at the Department of Road Machinery of NTU, [14] Fig. 1.



a b

a – design of the strain gauge suspension; b – scheme of strain link installation in the strain suspension
1,2 – metal structures; 3,4 – mounting plate; 5 – strain links

Figure 1 – Universal strain gauge suspension

The strain gauge suspension consists of two spatial all-welded metal structures interconnected by special strain links using embedded hinges. Using the Cartesian coordinate system, it enables to register three forces and three moments of these forces acting on the studied structure of the operating equipment when developing the soil in real time. These parameters include: traction force T, vertical component of the soil digging force by the rotor P_v, lateral force P_l, which can act on the actuator under study, coordinates of the application points

of the specified forces to the soil-developing actuator relative to the center of the strain gauge suspension [14]. In addition, relative to the stern of the base chassis (the center of the strain gauge suspension), normal P_N and tangential P_τ forces acting on the rotor cleaning bearing plate, moment M_b acting on the stern of the base chassis in deepening-excavating process of the actuator can be registered.

To assess the action of unknown external forces, denoted as P_x, P_y, P_z, the application center of which is shifted relative to the center of the strain gauge suspension O to unknown distances (a, b, c, respectively), an equation system of forces and moments of forces relative to the specified coordinate system has been developed, which describe the system equilibrium.

Each strain link operates only in compression or tension, the reactions in the strain links are denoted as R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6. Therefore, the equation system characterizing the spatial load of the strain gauge suspension (the stern of the basic chassis of the "full-scale" machinery) takes the form:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} F_{ix} = 0; \sum_{i=1}^{n} F_{iy} = 0; \sum_{i=1}^{n} F_{iz} = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} M_{ix} = 0; \sum_{i=1}^{n} M_{iy} = 0; \sum_{i=1}^{n} M_{iz} = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} R_3 + R_4 - R_x = 0; \\ R_5 + R_6 - R_y = 0; \\ R_1 + R_2 - R_z = 0; \\ (R_5 - R_6) \cdot H - P_y \cdot c - P_z \cdot b = 0; \\ (R_2 - R_1) \cdot H - P_z \cdot c - P_x \cdot c = 0; \\ (R_3 - R_4) \cdot H - P_x \cdot b - P_y \cdot a = 0. \end{cases} \tag{1}$$

Based on the measured absolute values of the reactions R_1-R_6 in the corresponding strain links, a system of six linear equations with six unknowns P_x, P_y, P_z, a, b, c is solved. As a result, the moments of the forces M_x, M_y, M_z relative to the entire specified coordinate system and the forces P_x, P_y, P_z themselves are determined.

All six strain links operate in pairs: (R_1, R_2), (R_3, R_4), (R_5, R_6). To determine the forces, algebraic addition is performed. And to determine the moments of forces, subtraction of the absolute values of the force reactions in the corresponding pairs of strain links is carried out, i.e.:

$$\begin{cases} P_x = R_3 + R_4; \\ P_y = R_5 + R_6; \\ P_z = R_1 + R_2; \end{cases} \quad \begin{cases} M_x = (R_5 - R_6) \cdot H; \\ M_y = (R_2 - R_1) \cdot H; \\ M_z = (R_3 - R_4) \cdot H. \end{cases} \tag{2}$$

This equation system can be solved not only by the traditional algebraic method, but also by adding or subtracting electrical signals coming from the strain gauges of the corresponding pairs of strain links.

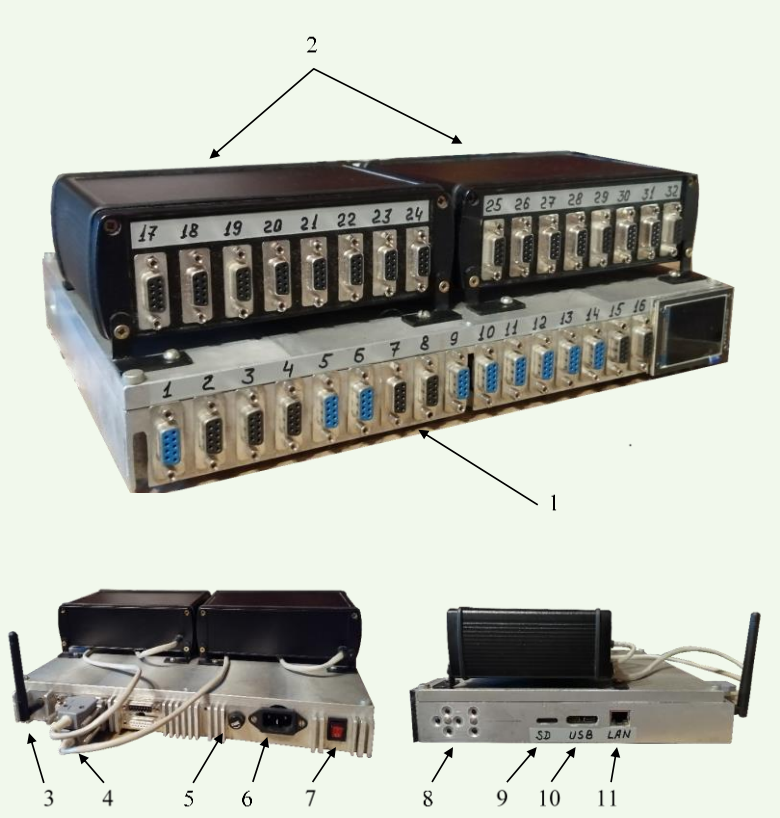
During experimental studies in the force load of the operating equipment of continuous earthmoving machinery when developing the soil, a specially created measuring and registering complex (Fig. 2) with a set of analog and discrete sensors was used to register real loads. The tools of the complex are capable of reading signals from the strain gauges (for example, a universal strain gauge suspension), as well as from pressure sensors, displacement (linear and angular), speed sensors, and registering the position of final switches in real time. The complex enables to record the received information on a micro SD memory card, convert the received signals into digital code, and store the received information (measurement results) on a digital medium for its further processing and analysis.

The complex (Fig. 2) includes:

- sixteen-channel unit for amplifying and recording of signals from measurement sensors (UAR16);
- two eight-channel amplification units (AU8).

The UAR16 unit of the complex includes two eight-channel strain gauge modules, a control unit and a

power supply unit. It amplifies signals from the strain gauges of the strain gauge suspension, which are connected to the unit using "bridge" or "half-bridge" schemes, and signals from analog sensors.



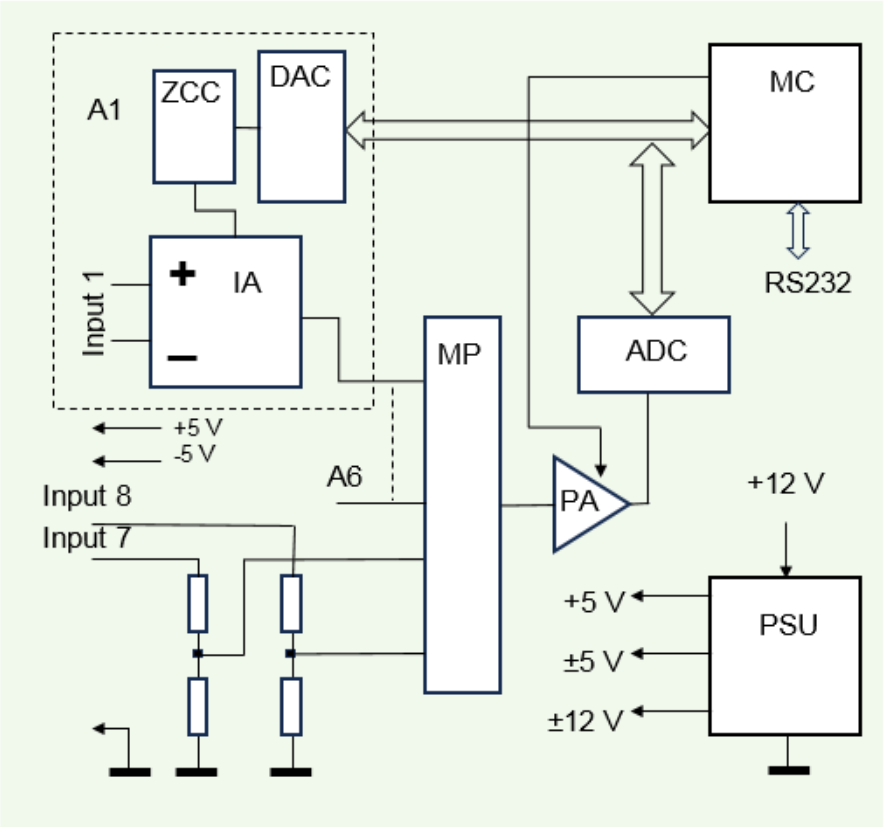
1 – 16-channel amplification, recording and control unit (UAR16), 2 – 8-channel amplification unit (AU8).

Figure 2 – General view of the complex

The strain gauge module of the complex (UAR16) is designed to provide power to strain gauges with precision DC voltage with an ultra-low oscillation level, to amplify and convert signals from strain gauges into digital code, and to correct "zero" when the strain gauge "bridge" or "half-bridge" is imbalances.

The block diagram of the strain gauge module is shown in Figure 3.

The module is controlled by an 8-bit microcontroller with built-in program memory. It includes a “bridge” of preamplifiers with a differential input and a built-in circuit for additional balancing of the strain gauge bridge (“zero” correction circuit). The zero correction circuit includes a digital-to-analog converter (DAC), which is controlled by a microcontroller. The signal at the DAC output is summed with the signal from the strain gauges, which register specific information from the point of signal measurement from the strain gauges. This ensures that the output signal of the amplifier is shifted to a constant value. At the same time, inputs 1 and 2 of the strain gauge module are designed to process signals from sensors that have an output signal of a higher voltage than the signal from the strain gauges. They do not have preamplifiers and are directly connected to the multiplexer. The multiplexer sequentially connects the signal of the corresponding input to the programmable amplifier and ensures the conversion of the analog signal from the sensor into a digital one using a precision analog-to-digital converter.



ADC – analog-to-digital converter, PSU – power supply unit, IA – input amplifier, MC – microcontroller, MP – multiplexer, A1 – channel 1 amplifier, A6 – channel 6 amplifier, PA – programmable amplifier, ZCC – zero correction circuit, DAC – digital-to-analog converter.

Figure 3 – Block diagram of the strain gauge module

The programmable amplifier has three amplification levels – 1; 10 and 100 times. The amplification level is selected by the microcontroller individually for each channel (measurement point) depending on the need.

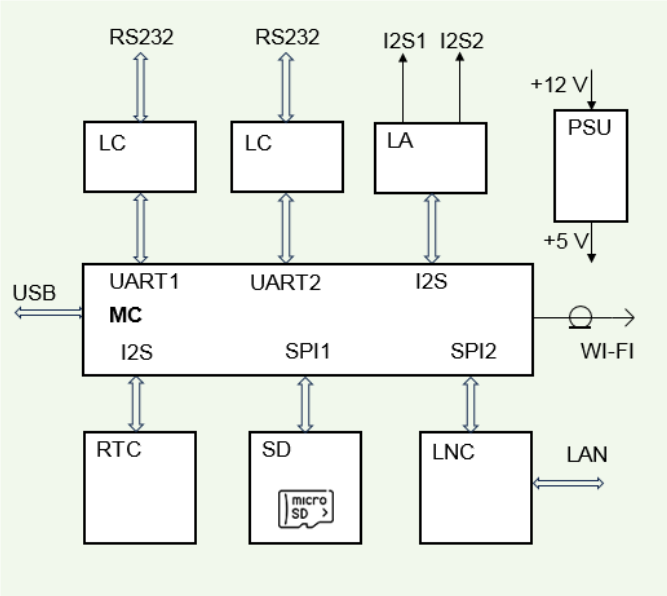
The UAR16 control unit is designed to control strain gauge modules using the above-mentioned RS232 interface and to control AU8 amplification units using the 12S interface, as well as to connect to a computer.

The block diagram of the control unit is shown in Figure 4.

The unit has eight input amplifiers with voltage dividers at the input to match the signal levels from the sensors and with the input signals of the amplifiers. Structurally, the units are built so that the outputs of the input amplifiers are fed to the inputs of four-channel analog-to-digital converters (ADCs).

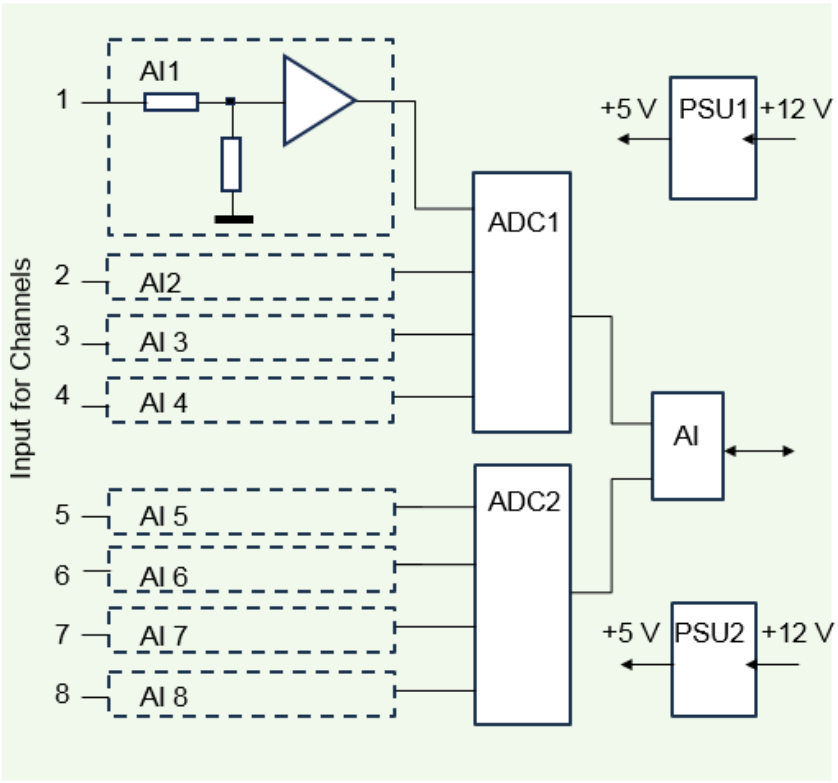
Each ADC has a programmable amplifier and an input signal switch, and is programmed and controlled via the 12S serial interface. A special server is built into the measuring complex.

When the information is provided from sensors during research, the browser page will display an oscilloscope screen with oscillograms of input signals from the measuring sensors of the first eight channels, Figure 6.



PSU – power supply unit, RTC – real-time clock, LNC – local network controller, LA – linear amplifier, MC – microcontroller, LC – level converter.

Figure 4 – Block diagram of the UAR16 control unit



ADC1 – analog-to-digital converter for channels 1-4, ADC2 – analog-to-digital converter for channels 5-8, PSU1 – power supply unit for channels 1-4, PSU2 – power supply unit for channels 5-8, IA1-IA8 – input amplifiers for channels 1-8, IA – I2S interface amplifier.

Figure 5 – AU8 Block Diagram



1 – color identification of oscillograms, 2 – oscillogram of channel No. 3, 3 – oscillogram visibility turn-on, 4 – setting the channel amplification coefficient, 5 – switching channel tabs, 6 – system restart, 7 – on/off recording of channels to a file, 8 – setting data update period, 9 – screen refresh turn-on, 10 – screen refresh turn-off.

Figure 6 – Oscilloscope screen

The oscilloscope screen has several fields with information and control over the process of reading and recording the information coming from the sensors.

This enables to identify the oscillogram of a separate channel through which a signal from a specific sensor is supplied by color, to change the visibility of the channel on the oscilloscope screen, to provide changes in the signal amplification of the corresponding channel (sensor) 1; 10; 100, to change the duration of the update period on the oscilloscope screen when performing this update.

Conclusions.

1. Measuring equipment has been created in the form of a strain gauge suspension for models of the studied structures of the operating equipment for trenching and excavation machinery. Using the Cartesian coordinate system, it provides real-time measurement of the magnitude and coordinates of applying three components of external forces and the moments of these forces action on the studied structure of the operating equipment when developing the soil.

2. Determining external forces and moments of force action based on strain gauge measurements using a strain gauge suspension is possible not only mathematically, but also by adding or subtracting electrical signals coming from the strain gauges of the corresponding pairs of strain links.

3. To register the real loads acting on the studied structure of the operating equipment of the earthmoving machinery, a measuring and registering complex with a set of analog and discrete sensors has been created. It enables measuring and registering the actual loads in the system with an accuracy of ± 5 % of the real value.

4. The complex enables to read and record the received information on a micro SD memory card, to convert the received signals into digital code, and store the received information (measurement results) on a digital medium for its further processing and analysis.

REFERENCES

1. Josef Kuneš (2012) Similarity and Modeling in Science and Engineering. Cambridge International Science Publishing; https://doi.org/10.1007/978-1-907343-78-0.

2. Paraska H.B., Prybeha D.V., Maidan P.S. (2017). *Metody ta zasoby eksperymental'nykh doslidzhen* [Methods and means of experimental research] Rivne, Condor Publ., 138 p. [in Ukrainian].

3. Khmara L.A., Holubchenko O.I., Tsvetkov F.V., Hlavatskyi K.T. *Stend dlya doslidzhen' zminnykh robochykh orhaniv hidravlichnoho ekskavatora* [Testbench to study removable actuators of a hydraulic excavator] Patent UA, no. 4910393, 1994. [in Ukrainian].

4. Khmara L.A., Dakhno O.O. *Stend dlya doslidzhennya roboty teleskopichnoho robochoho obladnannya odnokivshevoho ekskavatora zi zminnymy robochymy orhanamy* [Testbench to investigate a telescopic operating equipment of a single-bucket excavator with removable actuators] Patent UA, no. 103649, 2015. [in Ukrainian].

5. Holoborodko G.M., Perperi L.M., Palennyi Yu.G., Mihushchenko R.P. (2016). *Vymiryuval'nyy stend dlya eksperymental'noho vyznachennya parametriv vilnykh kolyvan* [Testbench to determine the parameters of free oscillations experimentally] *Systemy obrobky informatsii* – Information processing systems, 3 (140), pp. 48-51. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2016_3_14 [in Ukrainian].

6. Ratajczak Janusz. (1979). Accuracy of Measurements of the Loosening Force in Power Shovels. Przeglad Mechaniczny, 38 (21), pp. 19-21.

7. Dabrowski Henry, Kujawski Walery. (1989). Mapping of the operation load and wear estimation of the toothed gears of excavators at the stands for accelerated durability research. Politechnika Warszawska, Prace Naukowe, Mechanika, (121), pp. 81-90.

8. Khmara L.A., Dakhno O.O., Kosiak O.V. (2015) *Doslidzhennya protsesu kopannya gruntu teleskopichnym robochym obladnannyam odnokivshevoho hidravlichnoho ekskavatora* [Research into the process of digging the soil with the telescopic operating equipment of a single-bucket hydraulic excavator] Visnyk of NUVUtP – Bulletin of National University of Water and Environmental Engineering. Technical Sciences. №2 (70), pp. 364-381. [in Ukrainian].

9. Haponov O.O. (2021) *Pidvyshchennia efektyvnosti bahatoskrebkovykh lantsyuhovykh transheinykh ekskavatoriv na osnovi krytychnohlybynnoho blokovanoho rizannya gruntu* [Improving the efficiency of multi-scraper chain trench excavators based on critical depth soil blocked cutting]. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].

10. Dergunov O., Demenko A., Zalevska A., Fostenko K. (2017) *Kompyuteryzovanyi stend dlia vyprobuvannia hvyntomotornoii ustanovky lehkykh bezpilotnykh povitrianykh suden* [Computerized testbench to test pilotless aerial vehicles with propeller engines] *Systemy obrobky informatsii* – Information processing systems, 3 (149), pp. 10-13. [in Ukrainian].

11. Purdyk V. P., Pozdniakov M. Y. (2015). *Eksperymentalnyi stend ta metodyka vyznachennia dynamichnykh kharakterystyk hnuchkykh truboprovodiv vysokoho tysku* [Testbench and methodology for determining the dynamic characteristics of flexible high-pressure pipelines] *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu* – Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. №1, pp. 96-102. [in Ukrainian]

12. Khmara L.A., Dakhno O.O. (2014). *Modeliuvannia protsesu kopannia gruntu teleskopichnym robochym obladnanniam odnokivshevoho hidravlichnoho ekskavatora* [Modeling the process of digging the soil by a telescopic operating equipment of a single-bucket hydraulic excavator] *Hirnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny* – Mining, construction, road and land reclamation machines. 84, pp, 11-23. [in Ukrainian]

13. Rahulin V.M. (2020) *Pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia robochoho obladnannia avtohreidera stabilizatsiieiu navantazhennia mekhanizmu pidvisky tiahovoi ramy* [Improving the efficiency of using motor grader operating equipment by stabilizing the load of the traction frame suspension mechanism]. Candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].

14. Dmytrychenko, M.F., Musiiko V.D., Biliakovych, M.O., Koval, A.B. Voshchak, Yu.V., Kucher, O.P., Horkovenko, O.V. *Universalna tenzopidviska ta sposib dlia vyznachennia sylovykh parametriv prostorovykh navantazhen' robochykh orhaniv zemleryinykh mashyn* [Universal strain gauge suspension and

method for determining the force parameters of spatial loads of earthmoving machinery actuators] Patent UA, no. 111690, 2015. [in Ukrainian].

ОБЛАДНАННЯ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОГО СИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ СКЛАДНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Мусійко Володимир Данилович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: musvd@i.ua, тел: +380501040262, Україна, 01010 , м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226а, orcid.org/0000-0001-9983-3296.
Коваль Андрій Борисович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: kandr@i.ua, тел. +380500240894, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226, orcid.org/0000-0003-1295-8200.
Ніколаєнко Володимир Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: vanikolaienko@ukr.net, тел: +380679786117, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к.226. orcid.org/0000-0003-3983-0434.
Горідько Наталія Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри іноземної філології та перекладу, e-mail: natalia.horidko@ukr.net, тел.: +380679691349, Україна, 01010 , м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 207, orcid.org/0000-0002-9158-7163.
Пацьора Данило Іванович, аспірант, Національний транспортний університет, кафедра інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: dpatsora@gmail.com, тел.: +380996460618, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226, https://orcid.org/0000-0001-9515-3672.
Дубінін Максим Сергійович, аспірант, Національний транспортний університет, кафедра інженерії машин транспортного будівництва, e-mail: maxmk1989@gmail.com, тел.: +380678203604, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226, , https://orcid.org/0009-0009-2140-5131.

Анотація. У статті розглянуто питання обґрунтування конструкції та створення обладнання для визначення в реальному режимі часу характеристик просторового силового навантаження фізичних моделей робочих органів землерийних машин безперервної дії під час копання ґрунту, вимірювальної та реєструючої апаратури для фіксації параметрів силового навантаження в процесі розробки ґрунтів.

Мета дослідження: створення обладнання та реєструючої апаратури для визначення характеристик просторового силового навантаження складних механічних систем.

Об’єкт дослідження: робоче та ходове обладнання траншейних та котлованних землерийних машин безперервної дії.

Метод дослідження: експериментальний.

В результаті виконаних досліджень створено вимірювальне обладнання у вигляді тензометричної підвіски моделей конструкцій досліджуваного робочого обладнання траншейних і котлованних машин. Обладнання забезпечує в реальному режимі часу вимірювання величин та координат прикладання просторових складових зовнішніх сил та моментів дії цих сил на досліджувану механічну систему. Забезпечується визначення величин зовнішніх сил та моментів цих сил за даними тензометричних вимірювань не тільки математичним шляхом, а і шляхом додавання або віднімання електричних сигналів, що поступають від тензодатчиків відповідних пар тензоланок.

Для фіксації реальних навантажень, що діють на досліджувані конструкції робочого обладнання землерийних машин, створено вимірювально-реєструючий комплекс з комплектом

аналогових та дискретних датчиків, який дозволяє здійснювати вимірювання та реєстрацію діючих навантажень в системі з точністю 5% реальної величини.

Комплект дозволяє зчитувати та записувати отриману інформацію на карту пам'яті типу micro SD, перетворювати отримані сигнали в цифровий код та зберігати отриману інформацію (результати замірів) на цифровому носії для подальшої обробки та аналізу.

Ключові слова: момент, , тензометрія, землерийна машина, вимірювальний комплекс, датчик, карта пам'яті цифровий код, підсилювач, тензометричний модуль

УДК: 330.341:658
UDC: 330.341:658
DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-248-260

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ КАПІТАЛ ЯК ОСНОВА АКТИВІЗАЦІЇ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ

INTELLECTUAL CAPITAL AS A BASIS FOR ACTIVATING INNOVATIVE DEVELOPMENT OF TRANSPORT COMPLEX ENTERPRISES



Голова Інна Георгіївна *аспірант кафедри економіки, Національний транспортний університет, inna.golova@gmail.com, tel. +380677786658, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1*

https://orcid.org/ 0000-0001-9717-7109

Анотація. У роботі досліджено теоретичні засади поняття «інтелектуальний капітал» та виявлено його взаємозв'язок з інноваційним розвитком підприємств транспортного комплексу. Визначено, що вагомою передумовою входження України у світовий економічний простір є формування ефективної інноваційної моделі, яка має відповідати сучасним світовим вимогам та слугувати тією важливою засадою відтворення усіх процесів економічного розвитку країни. Інтелектуальний капітал підприємств транспортного комплексу залежить від рівня інновацій та стимулювання до створення інновацій в транспортній галузі. Наведено термінологічний підхід до визначення поняття «інтелектуальний капітал». Проведено аналіз сутності поняття «інтелектуальний капітал» та виділено ті, які найбільш глибоко висвітлюють категоріальні аспекти цього поняття. Наведено складові інтелектуального капіталу та визначено їх внесок в інноваційний розвиток.

Дослідженням виявлено, що інноваційні процеси здатні не тільки значно покращити основні економічні показники, але й вплинути на екологічну та соціальну складові, забезпечуючи, таким чином, стійкість і поступальний розвиток транспортної системи. Зазначено заходи, що сприяють стійкому відтворенню інтелектуального капіталу підприємств транспортного комплексу.

Метою статті є формування сутності та значення інтелектуального капіталу як основи активізації та зростання інноваційного розвитку підприємств транспортного комплексу в сучасних умовах.

Методи дослідження. Результати отримано за рахунок використання таких загальнонаукових методів дослідження, як: абстрагування та структурно-функціональний метод – при виокремленні складових категоріального змісту поняття «інноваційний розвиток», а також формуванні науково-теоретичного підходу для визначення впливу інноваційного розвитку на формування інтелектуального капіталу підприємство транспортного комплексу. Порівняльний аналіз було використано при визначенні позиції деяких країн світу в рейтингу Глобального індексу стійкої конкурентоспроможності.

Ключові слова: інтелектуальний капітал, інноваційний розвиток, підприємство транспортного комплексу, потенціал, активізація інноваційного розвитку.

Вступ. Постановка проблеми.

Транспортна галузь є однією з ключових галузей економіки України. Вона забезпечує внутрішні та зовнішні перевезення вантажів і пасажирів, а також сприяє розвитку інших галузей економіки.

За останні роки підприємства транспортного комплексу України зазнали значних потрясінь, що призвело до порушення їх діяльності та погіршення стану інфраструктури. Позитивні тенденції, такі як інвестиції в інфраструктуру та економічне зростання, були перервані негативними подіями, такими

як політична нестабільність, анексія Криму, збройний конфлікт, пандемія. Триваюча війна з росією завдала найбільшої шкоди транспортній інфраструктурі та мережам України.

При цьому слід враховувати, що швидкість сучасних змін змушує підприємства постійно трансформуватися, інтегрувати у свою діяльність нові технології та шукати ефективні форми командно-креативної роботи, що свідчить про підвищення ролі інтелектуального капіталу у формуванні конкурентних переваг. Отже, сьогодні ефективне управління інтелектуальним капіталом стає основним інструментом ведення конкурентної боротьби.

У сучасних економічних умовах інтелектуальний капітал підприємств транспортного комплексу служить основою підвищення їх конкурентоспроможності, тому набуває стратегічного значення для забезпечення їх розвитку.

Сучасні умови функціонування суспільства потребують нових підходів до підвищення ефективності діяльності підприємств, а саме: ефективного рівня управління підприємствами, прогресивних технологій та методів їх належного застосування, що вимагає підготовки інтелектуального капіталу як одного із пріоритетів інноваційного розвитку. Формування та впровадження інтелектуального капіталу на підприємствах потребує комплексних зусиль держави для подолання технологічної і організаційної відсталості більшості підприємств.

У сучасних умовах, зокрема в умовах воєнного стану, інноваційний розвиток підприємств транспортного комплексу України набуває особливого значення. Висока турбулентність зовнішнього середовища, руйнування логістичних ланцюгів, обмеження фінансових ресурсів та кадрові втрати вимагають від підприємств гнучкості, адаптивності та впровадження нових рішень.

Рівень інноваційного розвитку країн оцінюється міжнародними інституціями, що відображено у рейтингах, зокрема таких: Глобальний індекс інновацій (Global Innovation Index), Індекс інноваційного розвитку агентства Bloomberg (Bloomberg Innovation Index), Індекс глобальної конкурентоспроможності (Global Competitiveness Index), Інноваційний індекс Європейського інноваційного табло (Innovation Union Scoreboard), Міжнародний індекс захисту прав власності (Intellectual Property Right Index), Глобальний індекс конкурентоспроможності талантів (Global Talent Competitiveness Index).

Позиції України у більшості рейтингів свідчать про низьку інноваційну активність, про низький рівень інноваційного розвитку національної економіки, що характеризується/визначається індикаторами «використання інновацій», «створення нових знань», «використання інтелектуального капіталу», «захист інтелектуальної власності» тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вивченням питань сутності й розвитку інтелектуального капіталу займались такі вітчизняні й зарубіжні науковці, як: Г. Беккер, Т. Стюарт, Г. Житченко, О. Бутнік-Сіверський, О. Кендюхов, О. Собко, Й. Ситник та ін.

Проблеми інноваційного розвитку широко висвітлюються в наукових працях. О. Снігової, Т. Далєвської, Х. Патицької, Я. Пика, Г.Черноіванова. та ін. У своїх дослідженнях науковці наголошують на тому, що основними осередками інновацій є інституції. З огляду на існуючі наукові дослідження особливого значення набуває визначення ролі інтелектуального капіталу в основі інноваційного розвитку підприємства.

Метою статті є формування сутності та значення інтелектуального капіталу як основи активізації та зростання інноваційного розвитку підприємств транспортного комплексу в сучасних умовах.

Основна частина. Інноваційна активність підприємств транспортного комплексу стикається з численними перешкодами, які мають складну природу та багатофакторний характер. Ці перешкоди можуть проявлятися як через зовнішні загрози (економічні, політичні, екологічні, геополітичні), так і через внутрішні проблеми підприємств (організаційні, управлінські, фінансові). Їх комплексна оцінка та систематизація є необхідною умовою для формування ефективної інноваційної політики на рівні галузі та окремого підприємства [15].

Україна має високий освітній та науковий потенціал, здатний продукувати різноманітні нововведення у вигляді ідей, наукових розробок, патентів. Серед конкурентних переваг України варто виділити такі [1]:

- відповідно до Глобального індексу конкурентоспроможності - висока ємність ринку, якість вищої, середньої та професійної освіти (рис.1);

- відповідно до Глобального індексу інновацій основою української інноваційної конкурентоспроможності є людський капітал, тобто знання та навички, якими володіють люди, що дають змогу їм створювати цінність у світовій економічній системі. Його ефективна реалізація і є головною конкурентною перевагою (рис.2).

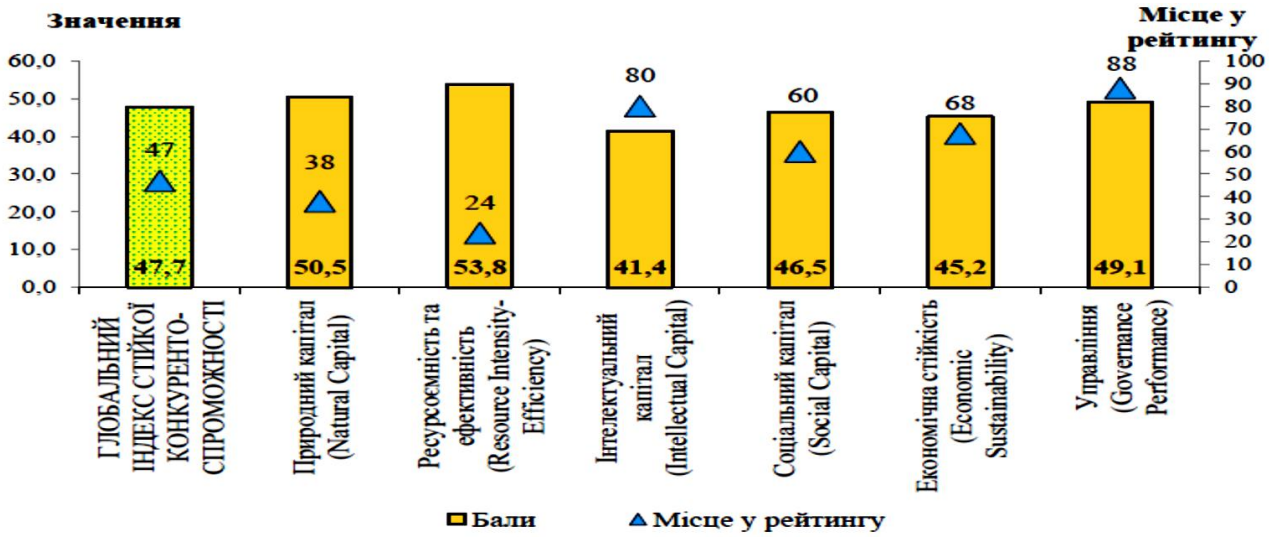


Рисунок 1 – Рейтинг України за показниками Глобального індексу стійкої конкурентоспроможності

Figure 1 – Ukraine's ranking according to the Global Sustainable Competitiveness Index

Джерело: Global Sustainable Competitiveness Index 2024 https://solability.com/download/the-global-sustainable-competitiveness-index-2024/?tmstv=1738063671

Україна, проти 2023 року (57 місце зі 180 країн світу), покращила свої показники на 10 позицій у 2024 року та посідає 47 місце (зі 191 країни світу). Цьогорічний бал 47,7, у 2023 р. – 46,2 (середній бал за рейтингом становить 43,9, а максимальний 100,0). Україна займає непогані місця за такими показниками конкурентоспроможності як «Ресурсоємність та ефективність (Resource Intensity-Efficiency)» – 24 місце (53,8) та «Природний капітал (Natural Capital)» – 38 місце (50,5), чого не можна сказати про показники «Інтелектуальний капітал (Intellectual Capital)» – 80 місце (41,4) та «Управління (Government Performance)»– 88 місце (49,1) (рис.1) [8].

Незважаючи на агресивну війну росії проти України, Глобальний інноваційний індекс 2024 року показує позитивні тенденції розвитку інновацій в нашій країні. Зокрема за такими підіндексами як: - Складність ринку – 85 місце (у 2023 р. – 104);

– Складність ведення бізнесу – 45 місце (48);

– Знання і технологічні результати – 34 місце (45) (рис.2) [8].

Вчені, працівники сфери управління, підприємці, фахівці у галузі фінансів, інженерії, високих технологій та інших галузей, що задіяні у процесі формування інформації та створення нових знань, визначаються новою інтелектуальною елітою суспільства, що формує основу суспільних благ та багатств розвинених країн світу, оскільки вони створюють середній клас соціуму, який є базисом його соціальної стабільності та визначає прогресивні зміни [4, с. 255].

Інтелектуальний капітал є ключовим фактором зростання інноваційного потенціалу підприємств транспортного комплексу, оскільки він забезпечує знання, навички та досвід, необхідні для створення та впровадження інновацій, що підвищують конкурентоспроможність та адаптивність до змін. Наявність інтелектуального капіталу (людський, організаційний, ринковий) дозволяє транспортним

підприємствам генерувати нові технології, покращувати послуги та ефективно використовувати ресурси в умовах інноваційного розвитку економіки[6].

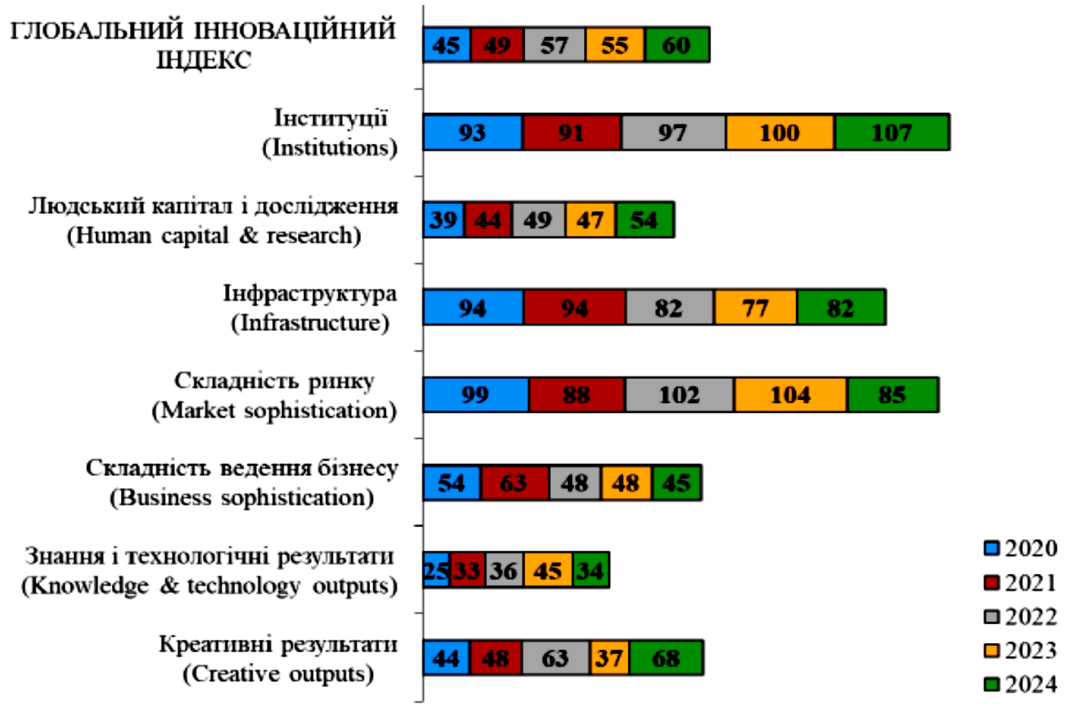


Рисунок 2 – Динаміка підіндексів Глобального інноваційного індексу України, місце у рейтингу за період 2020-2024 рр.

Figure 2 – Dynamics of sub-indices of the Global Innovation Index of Ukraine, place in the ranking for the period 2020-2024.

Джерело: The Global Innovation Index 2020 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_gii_2020.pdf

Інтелектуальний капітал впливає на інноваційний потенціал через:

– Людський капітал, тобто досвід та знання персоналу є основою для розробки інноваційних рішень; висока кваліфікація співробітників дозволяє швидко адаптуватися до технологічних змін.

– Організаційний та ринковий капітал, як ось - **с**истема управління знаннями, організаційні можливості та інформаційні канали є складовими інтелектуального капіталу; він дає можливість конвертувати знання в конкретну вартість, що робить компанію конкурентоспроможнішою.

– Інноваційна діяльність, завдяки інтелектуальному капіталу підприємство здатне реалізовувати інноваційні проєкти, що призводять до створення нових або покращених продуктів та послуг.

– Вплив на показники, а саме - інновації, що стали можливими завдяки інтелектуальному капіталу, можуть впливати на обсяг виробництва, споживання ресурсів та загальну ефективність діяльності підприємства; це дозволяє компанії бути більш стійкою до зовнішніх викликів та залишатися конкурентоспроможною на ринку.

Вагомий внесок у першопочаткову теорію інтелектуального капіталу зробив Г. Беккер [2]. Вітчизняні вчені досліджують інтелектуальний капітал підприємства з різних сторін, серед них варто виділити: О. Бутнік-Сіверського, який досліджував процес управління, використання та ідентифікації елементів інтелектуального капіталу через економічний і правовий аспекти, публікації присвячені питанням інтелектуальної власності та інтелектуалізації цифрової економіки; [2] О. Собко – досліджувала проблеми управління інтелектуальним потенціалом підприємств[13]; О. Грішнову, що

досліджує проблеми і соціальні аспекти розвитку людського капіталу, що є складовою інтелектуального капіталу та публікації присвячені особливостям трудових відносин на цифрових платформах.

Вчений Й. Ситник запропонував оригінальну структуру інтелектуального капіталу в якій виділяє шість елементів: людський, організаційний (структурний), споживацький, емоційний, релятивний капітал та інтелектуальну власність. До емоційного капіталу автор зараховує корпоративну ідентичність, організаційну культуру та психологічний клімат, а до релятивного – інвестиційну привабливість, акціонерну надійність та інституційний взірець в очах громадськості [141, с. 339–340].

Враховуючи наведені твердження поняття, погоджуємось із думкою таких вчених та вважаємо, що інтелектуальний капітал – це комплексне поняття, яке характеризує інтелектуальну працю, забезпечує створення нових технологій та інновацій в суспільство, а також зростання загальноосвітнього рівня регіонів.

Сутність інтелектуального капіталу також проявляється у його складових, які складають єдину економічну цінність об'єкта та у сукупності посилюють інтелектуальний потенціал транспортної галузі.

Аналізуючи визначення широкого кола дослідників, від давнини до сучасності, можна виділити категорії, з якими вчені ототожнюють поняття «інтелектуальний капітал» на різних етапах його розвитку (рис.3).

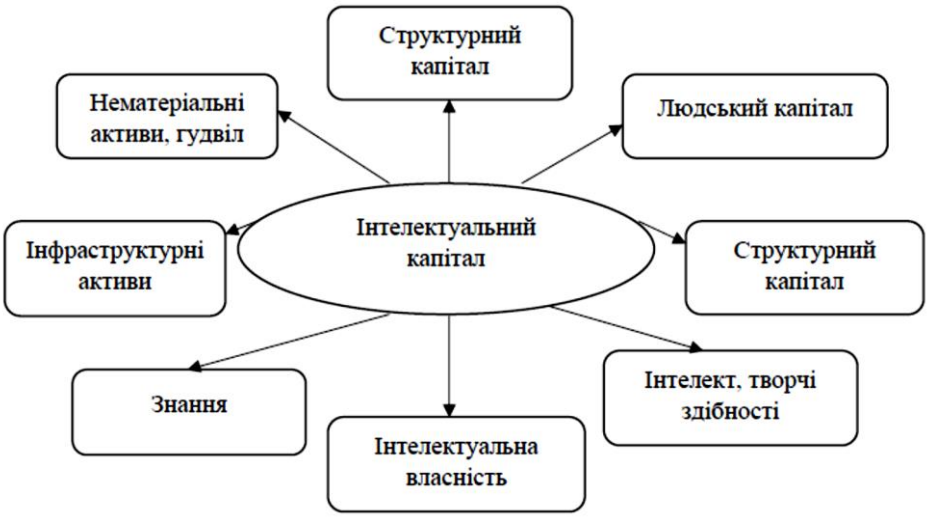


Рисунок 3 – Термінологічний підхід до визначення поняття «інтелектуальний капітал»
Figure 3 – Terminological approach to defining the concept of "intellectual capital"

Кожна із зазначених категорій утворюють єдину економічну цінність поняття та посилюють синергетичний ефект між собою, а їх взаємодія є результатом ефективного використання знань людини, її інтелекту та компетенцій, творчих здібностей та навичок.

У наш час більшість економістів-дослідників та бізнес-консультантів стверджують, що саме інноваційно-креативний напрям розвитку менеджменту компанії є запорукою за сучасних ринкових умов її конкурентоспроможності. Так, О. В. Вартанова відзначає: «В умовах інтелектуалізації капіталу особливу цінність для підприємства становлять так звані інноваційні працівники, до компетенцій яких належать творчі здібності, оригінальність ідей, креативність ... тому виникла специфічна галузь менеджменту – креативний менеджмент» [3, с. 31].

У сучасній економічній літературі можна виділити наступні підходи до аналізу сутності інтелектуального капіталу: визначення інтелектуального капіталу шляхом розкриття його структури (інтелектуальний капітал як єдність людського і структурного капіталу, сума нематеріальних активів підприємства); визначення інтелектуального капіталу шляхом аналізу його мети, тієї конкретної ролі,

яку він відіграє в процесі суспільного відтворення (інтелектуальний капітал як формалізований і зафіксований інтелектуальний матеріал, призначений для виробництва більш цінної власності; знання, що використовується для конкурентної переваги); визначення інтелектуального капіталу через встановлене розуміння сутності певних капіталовкладень (цінностей, ресурсів), що дозволяє отримувати дохід (інтелектуальний капітал як знання, здатний отримувати прибуток, бізнес-аналітику, здатний створювати нові цінності, генерувати дохід) [13].

Основою інноваційного розвитку будь-якого підприємства є інтелектуальний капітал, що, на думку вчених, представляє собою інформацію й знання, які відіграють роль «колективного мозку», що акумулює наукові й повсякденні знання працівників, інтелектуальну власність і накопичений досвід, спілкування й організаційну структуру, інформаційні мережі та імідж підприємства[15].

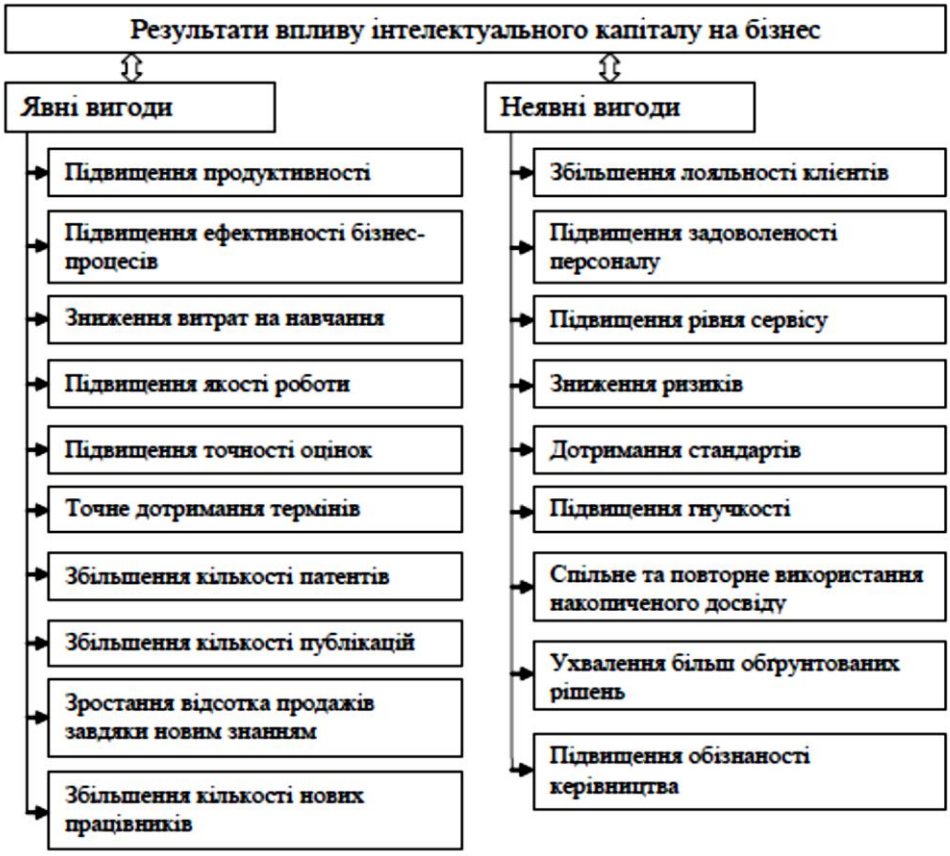


Рисунок 4 – Вплив управління інтелектуальним капіталом на транспортний бізнес
Figure 4 – The impact of intellectual capital management on the transport business

Формування та впровадження у розвиток підприємств транспортного комплексу усіх складових інтелектуального капіталу формує новий прогресивний рівень розвитку технологій, удосконалення економіки знань та створення інтелектуальних продуктів, послуг підприємств. Важливо визначити чинники, що впливають на формування та розвиток інтелектуального капіталу підприємств. Серед чинників, що впливають на інтелектуальний капітал можна виділити наступні:

– наявність висококваліфікованої робочої сили, здатної до трансформації та адаптації до ринкових змін, належного формування засад впровадження інтелектуальних продуктів;

– створення нематеріальних активів, що є конкурентоспроможними на світовому ринку;

– наявність фінансово-інвестиційного капіталу, який забезпечить підґрунтя для інвестування у розвиток передових технологій та робочу силу підприємств;

– систематичний розвиток і впровадження високих технологій у державі, їх комерціалізація та відтворення;

– наявність сучасної ринкової інфраструктури, яка стимулюватиме ринкові суб'єкти до впровадження нових технологій тощо.

Головна мета управління інтелектуальним капіталом підприємства полягає у забезпеченні прибутку підприємства. Результати впливу якості управління інтелектуальним капіталом на бізнес наведено на рисунку 4.

Для якісного управління інтелекуальним капіталом необхідно встановити залежність суми прибутку, отриманого підприємством від характеру і ступеня використання інтелектуального капіталу в інноваційних процесах, а також від розміру витрат на його створення чи придбання. Наявність такої залежності та відповідних розрахункових методик дозволило б підприємствам вже на етапі вироблення концепції побудови транспортного бізнесу оцінити можливі варіанти використання інтелектуального капіталу та вибрати найкращий з них для диверсифікації виробництва та створення інноваційної продукції, послуг, робіт[4].

Інтелектуальний капітал є ключовим фактором для формування інноваційної економіки, оскільки він включає знання, навички та досвід, які дозволяють створювати нові технології, продукти та послуги. Інвестиції в людський та інтелектуальний капітал (у освіту, наукові дослідження, патенти, "ноу-хау") призводять до інновацій, які покращують конкурентоспроможність та сприяють загальному економічному зростанню.

Взаємозв'язок інтелектуального капіталу та інноваційної економіки в наступному:

– Інтелектуальний капітал як основа інновацій: (знання, навички та досвід співробітників є джерелом нових ідей та рішень, які лежать в основі інновацій).

– Інвестиції у людський капітал: (інвестиції у здоров'я, освіту та розвиток навичок людей безпосередньо впливають на продуктивність та здатність створювати інновації).

– Інтелектуальні активи: (патенти, ліцензії, "ноу-хау" та інші нематеріальні активи є результатом інтелектуальної діяльності та можуть бути трансформовані у вартість, створюючи конкурентну перевагу).

– Інноваційна бізнес-модель: (успішне поєднання технічних рішень із ринковими можливостями, що базуються на інтелектуальному капіталі, є запорукою створення ефективної інноваційної моделі бізнесу).

– Шлях до інноваційної економіки: (інноваційна економіка характеризується постійним оновленням та якісним зростанням, що досягається завдяки впровадженню інновацій, які, в свою чергу, є продуктом інтелектуального капіталу).

Інноваційний розвиток підприємств транспортного комплексу — це систематичний процес впровадження нововведень (технологій, методів управління, послуг), що веде до оновлення та підвищення ефективності, конкурентоспроможності та якості роботи. Цей розвиток охоплює наукові, технологічні, організаційні, фінансові та комерційні кроки, які допомагають транспортним підприємствам адаптуватися до змін, покращувати процеси та пропонувати нові рішення, що відповідають потребам ринку [1].

Ключовими аспектами інноваційного розвитку транспортного комплексу мають бути:

– Технологічні інновації: Впровадження нових технологій для оптимізації маршрутів, підвищення швидкості, безпеки та зменшення витрат (наприклад, автоматизація, GPS-трекінг, цифрові платформи для логістики).

– Організаційні та управлінські інновації: Зміна підходів до управління підприємством, впровадження нових методів організації праці, оптимізація бізнес-процесів для підвищення ефективності.

– Інновації у послугах: Розробка та впровадження нових послуг для клієнтів, що відповідають їхнім вимогам, наприклад, інтегровані логістичні рішення, послуги "останньої милі" тощо.

– Дифузія інновацій: Поширення вже існуючих нововведень у нових сферах або для нових користувачів, що дозволяє посилювати ефект від інновацій.

– Підвищення конкурентоспроможності: Основна мета — досягнення кращих результатів порівняно з конкурентами завдяки впровадженню інновацій.

Етапами інноваційного процесу є:

– Винахід**:** Створення нової ідеї, технології чи продукту.

– Впровадження: Практичне застосування винаходу, що призводить до отримання стійкого ефекту.

– Дифузія: Поширення нововведення для використання в інших місцях або сферах.

Інноваційний розвиток транспорту спрямований на створення умов для економічного зростання, підвищення конкурентоспроможності національної економіки та покращення якості життя населення шляхом забезпечення доступу до безпечних і сучасних транспортних послуг, а також використання географічних особливостей країни як її конкурентних переваг [6].

Основні чинники, що зумовлюють потребу в інноваційному розвитку транспортних підприємств, включають:

− зростання конкуренції та прагнення до максимізації прибутку;

− збільшення попиту на транспортні послуги з боку споживачів;

− потребу в формуванні позитивного іміджу та репутації підприємства;

− необхідність впровадження наукових розробок і винаходів у процес надання послуг для підвищення ефективності діяльності [15].

Активізація інноваційної діяльності в транспортній галузі досягається через підтримку наукових, технологічних, організаційних та фінансових процесів, що призводять до впровадження нових продуктів або послуг. Це включає створення інноваційної інфраструктури, стимулювання інноваційних проєктів, покращення вже існуючих процесів доставки, а також розробку нових, які надають конкурентні переваги.

Основні напрямки активізації інноваційної діяльності підприємств транспортного комплексу наступні:

- Стимулювання досліджень та розробок**:** Фінансування наукових досліджень та розробок для створення нових технологій і покращення існуючих.

- Впровадження нових технологій**:** Застосування нових технічних рішень, програмного забезпечення та обладнання для оптимізації процесів, зменшення витрат та підвищення ефективності.

- Розвиток інноваційної інфраструктури**:** Створення мережі державних та приватних установ (інноваційні центри, технопарки), які підтримують усі етапи інноваційного циклу.

- Організаційні та управлінські інновації: Реорганізація процесів управління, впровадження нових систем планування, стимулювання співробітників та забезпечення ефективного менеджменту інноваційних проєктів.

- Залучення інвестицій: Створення умов для залучення як внутрішніх, так і зовнішніх фінансових ресурсів для реалізації інноваційних проєктів.

Прикладами інновацій у транспортній галузі є:

- Автоматизація та цифровізація: Впровадження систем автоматичного керування, GPS-трекінгу, електронного документообігу для оптимізації логістики.

- Екологічні рішення: Використання транспортних засобів з низьким рівнем викидів, впровадження електротранспорту, розвиток екологічно чистих видів палива.

-"Розумні" перевезення**:** Розробка та впровадження інтелектуальних систем управління трафіком, що дозволяють оптимізувати маршрути та зменшити затори.

- Електронні платформи: Створення онлайн-платформ для бронювання квитків, відстеження вантажів та покращення взаємодії між клієнтами та транспортними компаніями.

Інноваційний розвиток транспортної системи України є елементом підвищення ефективності та конкурентоспроможності національного транспорту, що включає як розвиток нових технологій, так і

покращення існуючих процесів. Механізми інноваційної діяльності в управлінні транспортною системою України можуть включати такі аспекти:

– Розробка стратегічних програм розвитку транспорту, що включають інноваційні напрямки.

– Визначення пріоритетів в інвестуванні в нові технології та інфраструктуру.

– Встановлення нормативно-правових актів, які стимулюють інноваційні процеси (наприклад, впровадження екологічних стандартів для транспортних засобів).

– Створення умов для співпраці з науковими установами та компаніями для розробки та впровадження нових технологій.

– Забезпечення фінансування на інноваційні проекти через державні фонди, субсидії або пільгові кредити.

– Розвиток інноваційної інфраструктури, зокрема засобів електричного транспорту, модернізація аеропортів, портів, залізничних та автобусних станцій.

– Впровадження "розумних" транспортних систем (IT-рішення для моніторингу та управління рухом, електронні тарифи тощо).

– Створення механізмів державно-приватного партнерства для розробки та впровадження інновацій [9].

Тому, зважаючи на масштабність і багатогранність завдань, управління інноваційним розвитком необхідно охоплювати як стратегічні, так і оперативні аспекти. Стратегічне управління інноваціями спрямоване на прогнозування глобальних змін в економічній ситуації, а також на пошук і реалізацію значущих інноваційних проєктів, які сприяють досягненню успіху та забезпечують ефективне функціонування та розвиток довгострокової перспективи.

Ефективна система стимулювання інноваційногої розвитку сприяє змінам переваг у мотивації персоналу, від орієнтації на базову соціалізацію та задоволення матеріальних потреб до реалізації власного потенціалу через участь у проектах і досягнення їх успішної реалізації. Залучення працівників підприємства до інноваційної діяльності забезпечує його потенціал та відкриває нові інноваційні перспективи. Це відбувається не шляхом тиску з боку керівництва, а завдяки усвідомленню важливості змін і безпосередній участі всіх співробітників у генеруванні ідей та створенні інновацій [9].

Інноваційні організаційно-методичні та методологічні підходи до вирішення проблем транспортної системи країни відносяться: модернізація майнових об'єктів; оптимізація господарського використання та управління; забезпечення фінансування інвестицій у розширене відтворення транспортної інфраструктури країни.

Управління інноваційною діяльністю є аспектом для будь-якої організації, ускладнює розвиток нових технологій, продуктів або послуг, які можуть забезпечити конкурентні переваги на ринку. Основні етапи та принципи управління інноваційною діяльністю включають:

– Стратегічне планування інновацій. Розробка довгострокових і довгострокових цілей, визначення пріоритетних напрямків для інновацій, з урахуванням ринкових умов і можливостей підприємства.

– Ідентифікація можливостей для інновацій. Оцінка внутрішніх і зовнішніх факторів, таких як нові технології, у запиті на продукти або послуги, конкуренція та зміни в нормативно-правовому середовищі.

– Розробка інноваційних ідей. Генерація нових ідей, тестування їх перевірки на життєздатність. Це може бути реалізовано через інноваційні лабораторії, мозкові штурми або відкриті інноваційні конкурси.

– Вибір та ідей розвитку. Вибір найперспективніших ідей для подальшого розвитку, планування та ресурсне забезпечення проектів.

– Реалізація інновацій. Втілення нових технологій або продукту на практиці. Це включає розробку прототипів, пілотні проекти, тестування та впровадження.

– Моніторинг та оцінка ефективності інновацій. Оцінка результатів інноваційної діяльності через аналіз економічних показників, відгуків споживачів та зворотного зв'язку з інших цікавих сторінок [1].

Для ефективного управління інноваційним розвитком необхідно розробити політику, що включає стимулювання інвестицій в інновації, підтримку державних і приватних ініціатив, а також

забезпечення стабільної правової та фінансової підтримки реалізації інноваційних проектів. Це дозволить створити умови для впровадження передових технологій, підвищення якості транспортних послуг та забезпечення зростання національної економіки через розвиток інфраструктури. Необхідно також покращити координацію між державними органами, місцевими владними структурами та приватними компаніями для максимально ефективного впровадження інновацій у транспортну сферу [6].

Але, інноваційна діяльність у транспортній системі України є ключовим чинником розвитку ефективної, безпечної та стійкої транспортної інфраструктури. Управління забезпечує комплексний підхід, що сприяє стратегічному плануванню, модернізації існуючих технологій, впровадженню новітніх рішень у транспортній галузі та інтеграції з міжнародними стандартами. Тому, з огляду на сучасні тенденції Україна повинна зосередитися на розвитку інновацій у таких напрямках:

– Екологічні технології — перехід до більшої кількості сталих видів транспорту, зокрема, електричні та гібридні транспортні засоби, що зменшують викидів шкідливих речовин.

– Цифровізація та автоматизація — впровадження смарт-системи управління транспортними потоками, автоматизованої платформи для обробки даних про рух транспорту, створення умов для використання безпілотних транспортних засобів.

– Інфраструктурні інновації — модернізація існуючих транспортних мереж та будівництво нових шляхів, мостів, терміналів з урахуванням інноваційних матеріалів і методів будівництва.

– Інтеграція різних видів транспорту — розвиток мультимодальних перевезень, які забезпечують зручний та швидкий перехід між безкоштовними транспортними засобами, підвищуючи логістику та доступність транспортних послуг.

– Залучення приватних інвестицій та співпраця з міжнародними партнерами — для розвитку інновацій важливо стимулювати партнерство та інвестиції з боку бізнесу та міжнародних фінансових організацій [1].

Управління інноваційною діяльністю в транспортній системі України потребує чіткої політики, підтримуваної з боку держави та розробки механізмів, які забезпечують ефективне застосування інновацій для досягнення стратегічних цілей розвитку транспортної галузі країни.

Таким чином, перспективи розвитку інноваційної діяльності в транспортній системі України починаються обов’язковою адаптацією до глобальних тенденцій і технологічних змін, а також вимогами до екологічної стабільності, енергоефективності та безпеки. Основними напрямками розвитку є впровадження інтелектуальних транспортних систем (ITC), розвиток електричного та автономного транспорту, а також інтеграція цифрових рішень для оптимізації перевезень та зниження витрат [9].

Для досягнення високих результатів у розвитку інновацій на транспорті в Україні необхідно створити сприятливі умови для інвестування, вдосконалити нормативно-правову базу, стимулювати наукові дослідження та розробки в галузі транспорту, а також забезпечити ефективну взаємодію між державними та приватними структурами. Важливим аспектом є також підвищення кваліфікації кадрів та розвиток партнерства з міжнародними технологічними компаніями.

Перспективи реалізації інноваційних проектів у транспорті залежать від політичної стабільності, здатності адаптувати інфраструктуру до нових технологій, а також готовності суспільства і бізнесу до інновацій. Якщо ці умови будуть виконані, інноваційна діяльність стане основою для модернізації та розвитку транспортної системи України, що дозволить підвищити її конкурентоспроможність на міжнародній арені та забезпечити сталий розвиток економіки.

Висновки. Таким чином, успішне створення та просування інтелектуального капіталу підприємств транспортного комплексу стає ключовим фактором для стимулювання інноваційного розвитку підприємств. Перехід до інноваційної економіки можливий лише за умови максимально ефективного використання інтелектуальних ресурсів, знань та компетенцій суспільства, а також сучасних технологій та інформаційних ресурсів

Для забезпечення сталого розвитку транспортної системи необхідно впроваджувати інновації в різних сферах: від використання нових технологій і матеріалів до удосконалення організаційних та

управлінських процесів. Особливу увагу слід приділити розвитку інтелектуальних транспортних систем, електричних та екологічних транспортних засобів, а також оптимізації логістичних ланцюгів через впровадження цифрових технологій.

Цифрова трансформація, прозорість, екологічні технології, партнерство з приватним сектором та модернізація транспорту створюють основу для ефективної та сталої транспортної інфраструктури. Для досягнення успіху потрібна скоординована державна політика, залучення міжнародного досвіду та підтримка громадськості. Інвестиції в інновації сьогодні забезпечать конкурентоспроможність транспортної системи України у майбутньому.

Перелік посилань

1.Белянська Ю. В. МЕХАНІЗМ УПРАВЛІННЯ ІННОВАЦІЯМИ НА ТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ. *Економічний вісник*, 2022, №4. С.137-145. https://doi.org/10.33271/ebdut/80.137

2.Бутнік-Сіверський О. Б. Інтелектуальний капітал (теоретичний аспект) [Електронний ресурс]. Реж. доступу: http://dspace.nuft.edu.ua/bitstream/123456789/9823/1/intelektualnii_kapital.pdf

3. Вартанова О.В. Креативний менеджмент як підґрунтя розвитку креативних працівників підприємства / О.В. Вартанова,І.В. Шестер // Соціально-трудові відносини: теорія та практика. – 2013. – № 2. – С. 30–34.

4. Житченко Г. О. Сутність та визначення поняття «інтелектуальний капітал». *Економіка і суспільство.* 2017. Вип. 12. С. 255-259.

5.Ільченко С. В., Машканцева С. О. Інвестиційний клімат розвитку транспортної галузі в контексті економічних тенденцій регіону. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/5956/1/40.pdf

6.Колот А.М. Інноваційна праця та інтелектуальний капітал у системі факторів формування економіки знань / А.М.Колот // *Економічна теорія.* –2007. № 2. С. 3 –13.

7.Козак Л. С., Федорук О. В. Особливості формування ефективної моделі інноваційного розвитку транспортно-дорожнього комплексу України. *Економіка та держава*.2020. № 3. С. 53–60.

8.Наукова, науково-технічна та інноваційна діяльність в Україні у 2024 році: науково-аналітична доповідь / Т.В. Писаренко, Т.К. Куранда та ін. – К.: УкрІНТЕІ, 2024. – 115 с.

9.Попов С. А. ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙ В ПУБЛІЧНОМУ УПРАВЛІННІ ДЛЯ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ. *Журнал «Наукові інновації та передові технології» № 6(46) 2025* https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-6(46)-244-252

10..Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Закон України від 30 травня 2018 року № 430-р. URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-р. (дата звернення: 10.10.2025)

11.Про схвалення Стратегії розвитку сфери інноваційної діяльності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України № 526-р від 10.07.2019 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/526-2019-р#Text (дата звернення: 11.09.2025).

12.Спіцина А.Є. Інноваційні технології управління персоналом транспортної галузі в епоху цифрової економіки./ *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". Серія: "Економічні науки"*: https://www.inter-nauka.com/issues/economic2023/12/9635

13.Собко О. Інтелектуальний капітал підприємства: концептуалізація – функціонування – розвиток: монографія. Тернопіль: Крок, 2014. 360 с.

14.Ситник Й. С. Інтелектуалізація капіталу організації та його структурування / Й. С. Ситник // Формування ринкової економіки : зб. наук. пр. Спец. вип. : у 2 ч Ч. 1: *Стратегічні імперативи сучасного менеджменту* ; відп. за вип. С. М. Соболь. – К. :КНЕУ, 2012. – С. 332–342.

15.Управління інноваційним розвитком : навч. посібн. / Юринець З.В., Гнилянська Л.Й., Юринець Р.В. – Львів : СПОЛОМ, 2021. 132 с.

16.Черноіванова Г.С. Організаційно-економічне забезпечення управління інноваціями та інноваційною працею: монографія. Харків: ФОП Лібуркіна Л.М., 2018. 284 с.

INTELLECTUAL CAPITAL AS A BASIS FOR ACTIVATING INNOVATIVE DEVELOPMENT OF TRANSPORT COMPLEX ENTERPRISES

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, 1https://orcid.org/ 0000-0001-9717-7109

Abstract. The paper explores the theoretical foundations of the concept of "intellectual capital" and reveals its relationship with the innovative development of transport complex enterprises. It is determined that a significant prerequisite for Ukraine's entry into the world economic space is the formation of an effective innovation model, which must meet modern global requirements and serve as an important basis for reproducing all processes of the country's economic development. The intellectual capital of transport complex enterprises depends on the level of innovation and incentives for creating innovations in the transport industry. A terminological approach to defining the concept of "intellectual capital" is presented. An analysis of the essence of the concept of "intellectual capital" is carried out and those that most deeply illuminate the categorical aspects of this concept are highlighted. The components of intellectual capital are presented and their contribution to innovative development is determined. The study reveals that innovative processes are capable of not only significantly improving the main economic indicators, but also influencing the environmental and social components, thus ensuring the sustainability and progressive development of the transport system. Measures that contribute to the sustainable reproduction of intellectual capital of transport complex enterprises are indicated. The purpose of the article is to form the essence and meaning of intellectual capital as the basis for the activation and growth of innovative development of transport complex enterprises in modern conditions. Research methods. The results were obtained through the use of such general scientific research methods as: abstraction and structural-functional method - when isolating the components of the categorical content of the concept of "innovative development", as well as the formation of a scientific and theoretical approach to determine the impact of innovative development on the formation of intellectual capital of a transport complex enterprise. Comparative analysis was used to determine the position of some countries in the world in the rating of the Global Index of Sustainable Competitiveness.

Keywords: intellectual capital, innovative development, transport complex enterprise, potential, activation of innovative development.

References

1.Belianska Yu. V. MEKhANIZM UPRAVLINNIa INNOVATsIIaMY NA TRANSPORTNYKh PIDPRYIeMSTVAKh. Ekonomichnyi visnyk, 2022, №4. S.137-145. https://doi.org/10.33271/ebdut/80.137

2.Butnik-Siverskyi O. B. Intelektualnyi kapital (teoretychnyi aspekt) [Elektronnyi resurs].
Rezh. dostupu: http://dspace.nuft.edu.ua/bitstream/123456789/9823/1/intelektualnii_kapital.pdf

3. Vartanova O.V. Kreatyvnyi menedzhment yak pidgruntia rozvytku kreatyvnykh pratsivnykiv pidpryiemstva / O.V. Vartanova,I.V. Shester // Sotsialno-trudovi vidnosyny: teoriia ta praktyka. – 2013. – № 2. – S. 30–34.

4. Zhytchenko H. O. Sutnist ta vyznachennia poniattia «intelektualnyi kapital». Ekonomika i suspilstvo. 2017. Vyp. 12. S. 255-259.

5.Ilchenko S. V., Mashkantseva S. O. Investytsiinyi klimat rozvytku transportnoi haluzi v konteksti ekonomichnykh tendentsii rehionu. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/5956/1/40.pdf

6.Kolot A.M. Innovatsiina pratsia ta intelektualnyi kapital u systemi faktoriv formuvannia ekonomiky znan / A.M.Kolot // Ekonomichna teoriia. –2007. № 2. S. 3 –13.

7.Kozak L. S., Fedoruk O. V. Osoblyvosti formuvannia efektyvnoi modeli innovatsiinoho rozvytku transportno-dorozhnoho kompleksu Ukrainy. Ekonomika ta derzhava.2020. № 3. S. 53–60.

8.Naukova, naukovo-tekhnichna ta innovatsiina diialnist v Ukraini u 2024 rotsi: naukovo-analitychna dopovid / T.V. Pysarenko, T.K. Kuranda ta in. – K.: UkrINTEI, 2024. – 115 s.

9.Popov S. A. ZASTOSUVANNIa INNOVATsII V PUBLIChNOMU UPRAVLINNI DLIa ROZVYTKU TRANSPORTNOI SYSTEMY UKRAINY. Zhurnal «Naukovi innovatsii ta peredovi tekhnolohii» № 6(46) 2025 https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-6(46)-244-252

10..Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku : Zakon Ukrainy vid 30 travnia 2018 roku № 430-r. URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r. (data zvernennia: 10.10.2025)

11.Pro skhvalennia Stratehii rozvytku sfery innovatsiinoi diialnosti na period do 2030 roku : Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy № 526-r vid 10.07.2019 r. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/526-2019-r#Text (data zvernennia: 11.09.2025).

12.Spitsyna A.Ie. Innovatsiini tekhnolohii upravlinnia personalom transportnoi haluzi v epokhu tsyfrovoi ekonomiky./ Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "Internauka". Seriia: "Ekonomichni nauky": https://www.inter-nauka.com/issues/economic2023/12/9635

13.Sobko O. Intelektualnyi kapital pidpryiemstva: kontseptualizatsiia – funktsionuvannia – rozvytok: monohrafiia. Ternopil: Krok, 2014. 360 s.

14.Sytnyk Y. S. Intelektualizatsiia kapitalu orhanizatsii ta yoho strukturuvannia / Y. S. Sytnyk // Formuvannia rynkovoi ekonomiky : zb. nauk. pr. Spets. vyp. : u 2 ch Ch. 1: Stratehichni imperatyvy suchasnoho menedzhmentu ; vidp. za vyp. S. M. Sobol. – K. :KNEU, 2012. – S. 332–342.

15.Upravlinnia innovatsiinym rozvytkom : navch. posibn. / Yurynets Z.V., Hnylianska L.I., Yurynets R.V. – Lviv : SPOLOM, 2021. 132 s.

16.Chernoivanova H.S. Orhanizatsiino-ekonomichne zabezpechennia upravlinnia innovatsiiamy ta innovatsiinoiu pratseiu: monohrafiia. Kharkiv: FOP Liburkina L.M., 2018. 284 s.

УДК 330.341.1:334.012.64 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-261-273**
UDC 330.341.1:334.012.64

МЕХАНІЗМИ СТИМУЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ МАЛИХ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ У КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛЬНОЇ КОНКУРЕНЦІЇ ЗА ТРУДОВІ РЕСУРСИ

MECHANISMS FOR STIMULATING THE DEVELOPMENT OF SMALL HIGH-TECH ENTERPRISES IN THE CONTEXT OF GLOBAL COMPETITION FOR LABOUR RESOURCES



Матеящук Богдан Михайлович, Ph.D. аспірант, Національний транспортний університет, Київ, Україна, mateiashchuk@gmail.com, тел. +380931247811, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1,

https://orcid.org/0009-0005-8861-019X

Анотація. Стаття присвячена дослідженню механізмів стимулювання розвитку малих високотехнологічних підприємств України в умовах зростаючої глобальної конкуренції за трудові ресурси. У роботі обґрунтовано роль інституційно-правових інструментів, зокрема сучасних цифрових режимів, які поєднують податкові стимули, гнучкі трудові механізми та організаційні умови для посилення конкурентоспроможності ММСП. Відзначено, що в умовах воєнного стану та масштабної міграції кадрів особливої ваги набувають інструменти, які сприяють збереженню та відтворенню трудового потенціалу.

Проаналізовано економічні та правові механізми, що впливають на зайнятість, обсяги інвестицій та ділову активність малого бізнесу. Показано, що розширення спеціальних режимів на R&D, MilTech та інші технологічні напрями зумовило зростання кількості резидентів та податкових надходжень, а перехід від ФОП-моделі до гіг-контрактів сприяв детінізації та підвищенню податкової дисципліни.

Окреслено регуляторні виклики, пов’язані з невідповідністю між кваліфікованими видами діяльності та системою КВЕД, а також підкреслено потребу гармонізації нормативної бази. Практична цінність дослідження полягає у визначенні напрямів удосконалення державної політики, зокрема щодо підтримки ММСП, повернення вимушених переселенців та реінтеграції ветеранів.

Ключові слова: малі та середні підприємства (ммсп), спеціальні правові режими; цифрова економіка; інноваційна діяльність; податкові стимули; детінізація зайнятості; r&d; конкурентоспроможність бізнесу.

Постановка проблеми. Малий бізнес є ключовим структурним елементом національної економіки, відіграє провідну роль у забезпеченні стійкості соціально-економічного розвитку, створенні робочих місць та формуванні інноваційних рішень. В умовах воєнного стану та загострення глобальної конкуренції за трудові ресурси зростає значущість дієвості державних інструментів стимулювання розвитку малого підприємництва. Українські мікро-, малі та середні підприємства (ММСП) стикаються з дефіцитом кваліфікованих кадрів, обмеженим доступом до фінансових ресурсів, підвищеним рівнем підприємницьких ризиків і необхідністю оперативної адаптації бізнес-моделей до умов тривалої нестабільності. За таких обставин науково обґрунтована оцінка та вдосконалення механізмів підтримки ММСП є передумовою формування ефективної економічної політики у післявоєнний період.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження засвідчують, що в Україні поступово сформовано комплекс різноспрямованих інструментів державної підтримки малого підприємництва, які охоплюють регуляторний, фінансовий, інфраструктурний, інституційний і кадровий напрями. У воєнний час особливої ваги набувають їхня оперативність, адаптивність та здатність забезпечувати адресне реагування на зміни зовнішнього середовища.

За висновками В. В. Дикань і Н.Л. Фролової, з початком повномасштабної агресії істотно зросли потреби МСП у доступному фінансуванні, механізмах релокації та дерегуляційних рішеннях. У відповідь держава запровадила низку першочергових заходів, серед яких програма пільгового кредитування «5–7–9 %», спрощення процедур ліцензування та реєстрації, механізми релокації підприємств і грантові програми підтримки бізнесу [1]. Ці інструменти визначено як базові умови відновлення підприємницької активності та збереження зайнятості.

Л.Є. Сімків і П.П. Чорний зазначають, що в умовах воєнного періоду державна підтримка ММСП має спрямовуватися не лише на фінансову стабілізацію, а й на мінімізацію кадрових втрат та відтворення трудового потенціалу. Науковці виокремлюють найбільш дієві заходи: програми збереження робочих місць, механізми часткової компенсації безробіття, грантові інструменти створення нових робочих місць та інструменти стимулювання експорту [2]. Особливий акцент робиться на підтримці заходів, що забезпечують утримання кваліфікованих працівників, формування можливостей професійного навчання та залучення нових фахівців.

Теоретичні засади політики стимулювання розвитку малого підприємництва ґрунтуються на дослідженнях фінансового механізму державної підтримки МСП. За підходом В.А. Кручиненка , фінансовий механізм становить багатокомпонентну систему, що включає інструменти бюджетного фінансування, кредитних ресурсів, податкових стимулів, гарантійних програм та інших форм фінансового сприяння, спрямованих на забезпечення стійкого функціонування підприємницького сектору [3]. Автор наголошує, що передумовами ефективності такого механізму є узгодженість державної фіскальної політики, наявність інструментів оцінювання результативності програм підтримки та цільове використання ресурсів.

У дослідженні Я.В. Устінова [4] проаналізовано відмінності між традиційною моделлю ФОП 3-ї групи та спеціальними податковими механізмами, що застосовуються в сучасних цифрових режимах. Автор доводить, що перехід від ФОП-моделі до формалізованих форматів зайнятості сприяє підвищенню соціальних гарантій, зменшенню тінізації та створенню більш стабільного кадрового середовища. Ці висновки підтверджують значущість податкових інструментів у розвитку малого бізнесу та утриманні висококваліфікованих працівників в умовах глобальної конкуренції.

У статті В.О Тімашова та Н.Є Гейко [5] акцентується увага на правових засадах функціонування спеціальних економічних режимів, зокрема принципах корпоративної автономії, договірної гнучкості та посиленого захисту інтелектуальної власності. Автори обґрунтовують, що юридична визначеність і стабільність є ключовими факторами залучення інвестицій та формування довіри до інноваційних форм підприємницької діяльності. Це дослідження доповнює загальну аргументацію статті, демонструючи важливість якісного правового середовища для розвитку ММСП у високотехнологічних секторах.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження механізмів стимулювання розвитку малих високотехнологічних підприємств в Україні в умовах глобальної конкуренції за трудові ресурси, а також оцінювання ефективності спеціальних інституційно-правових режимів, що впливають на розвиток ММСП. У фокусі аналізу перебуває спеціальний правовий режим, який поєднує податкові стимули, гнучкі трудові інструменти та інституційні гарантії, що сприяють формуванню конкурентоспроможного кадрового середовища та підвищенню інноваційної активності підприємств. Завданням дослідження є визначення ключових чинників, що забезпечують позитивну динаміку залучення компаній до режиму, оцінювання впливу податкових і регуляторних стимулів на зайнятість та ділову активність, а також виявлення нормативних та інституційних бар’єрів, які стримують його масштабування.

Для досягнення поставленої мети здійснено аналіз останніх досліджень і публікацій, статистичних даних, результатів опитувань резидентів, а також національного й міжнародного досвіду застосування цифрових правових режимів. Особлива увага приділяється оцінюванню ролі секторного розширення, детінізації трудових відносин, податкової мотивації та інституційної довіри як факторів, що визначають ефективність стимулювання малого високотехнологічного бізнесу. Важливою складовою постановки завдання є обґрунтування необхідності вдосконалення нормативної бази, гармонізації класифікації економічних видів діяльності та розширення механізмів адресної підтримки підприємств у контексті повоєнного відновлення економіки та реінтеграції трудових ресурсів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасні умови розвитку підприємництва в Україні характеризуються високою інтенсивністю конкуренції за кваліфіковані трудові ресурси. Масове переміщення та міграція фахівців, зумовлені воєнними та соціально-економічними факторами, створюють додаткові виклики для формування конкурентоспроможного та безпечного бізнес-середовища. Згідно з аналітичними звітами OECD, цифрові інноваційні правові режими можуть виступати каталізаторами стійкого економічного відновлення, розвитку інноваційної інфраструктури та підвищення глобальної конкурентоспроможності ММСП [6].

У цьому контексті запровадження 8 лютого 2022 року спеціального правового режиму «Дія.Сіті» [7] стало одним із ключових стратегічних напрямів державної політики стимулювання високотехнологічного та інноваційного підприємництва. «Дія.Сіті» належить до моделей цифрових економічних хабів, подібних до європейських Digital Hubs у Польщі та Естонії, які забезпечили зростання експорту технологічних послуг і формування сучасних IT-та R&D-екосистем. Відмінністю української моделі є поєднання сучасних правових інструментів (гіг-контракти, механізми захисту інтелектуальної власності, корпоративна автономія) з економічними стимулами (спрощена податкова модель, застосування податку на виведений капітал, пільгові умови реінвестування прибутку).

Основні критерії набуття статусу резидента «Дія.Сіті» включають такі вимоги [7].

Для чинних компаній:

- середній розмір винагороди спеціалістам еквівалентний не менше ніж 1200 євро;
- не менше 90 % доходу формується в межах кваліфікованих видів діяльності;
- мінімальна чисельність штатних працівників та/або гіг-спеціалістів — не менш як 9 осіб.

Для стартапів:

- річний дохід не перевищує 8,3 млн грн;
- не менше 90 % доходу забезпечується кваліфікованими видами діяльності;
- строк державної реєстрації — не більше 24 місяців до моменту подання заявки на резидентство.

Водночас міжнародний досвід доводить необхідність розширення дії подібних режимів поза межі IT-сектора — на сферу креативних індустрій, інжинірингових і технологічних сервісів. Це дозволить забезпечити горизонтальне зростання малого бізнесу, посилити інтеграцію у глобальні ланцюги вартості та утримати висококваліфікованих працівників усередині країни.

Так розширення режиму Дія.Сіті на компанії, що здійснюють дослідження та розробки (R&D) у будь-якій галузі, набуло чинності 21 лютого 2025 року. Це стало важливою інституційною зміною, яка суттєво вплинула на динаміку резидентства. До цього моменту режим був фактично сфокусований на IT-секторі — програмній інженерії, кібербезпеці, геймдеві, компаніях технологічного консалтингу. Після розширення коло потенційних резидентів зросло в кілька разів, адже R&D-діяльність здійснюють компанії у військовій, фармацевтиці, біотехнологіях, інжинірингу, автомобілебудуванні, матеріалознавстві, енергетиці, медицини та оборонних технологіях.

Дослідження, проведене серед резидентів і потенційних резидентів Дія.Сіті [6] , демонструє високий рівень задоволеності правовим режимом та підтверджує його значний вплив на розвиток технологічного бізнесу, особливо малого та середнього. Понад половина респондентів (52 %) повністю задоволені перебуванням у режимі, а ще 46,2 % оцінюють свій досвід як переважно позитивний, що свідчить про стійку довіру до інституційної моделі. Аналіз часу приєднання вказує на те, що найбільш активна хвиля зростання резидентів припала на 2023–2024 роки, коли компанії побачили зниження

ризиків і стабілізацію правозастосовної практики. При цьому 76 % опитаних представляють усталений бізнес, а 24 % — стартапи, що свідчить про універсальність моделі для компаній різного масштабу.

Таблиця 1 – Механізми стимулювання малого підприємництва у межах «Дія Сіті».
Table 1 – Mechanisms for stimulating small business within the framework of "Diya City".

Напрям стимулювання	**Характеристика**	**Очікуваний ефект**
Податкові стимули	Зниження податку на прибуток до 9%, спрощення адміністрування	Підвищення рентабельності малого бізнесу
Гнучкі трудові відносини	Контракти гіг-формату, можливість віддаленої роботи	Збереження кадрів та адаптація до глобальної конкуренції
Інвестиційна привабливість	Гарантії правового захисту інвесторів, міжнародне визнання	Залучення іноземного капіталу та експансія стартапів
Освітні програми	Підготовка IT-кадрів, партнерства з університетами	Підвищення людського капіталу малого бізнесу

Водночас міжнародний досвід доводить необхідність розширення дії подібних режимів поза межі IT-сектора — на сферу креативних індустрій, інжинірингових і технологічних сервісів. Це дозволить забезпечити горизонтальне зростання малого бізнесу, посилити інтеграцію у глобальні ланцюги вартості та утримати висококваліфікованих працівників усередині країни.

Так розширення режиму Дія.Сіті на компанії, що здійснюють дослідження та розробки (R&D) у будь-якій галузі, набуло чинності 21 лютого 2025 року. Це стало важливою інституційною зміною, яка суттєво вплинула на динаміку резидентства. До цього моменту режим був фактично сфокусований на IT-секторі — програмній інженерії, кібербезпеці, геймдеві, компаніях технологічного консалтингу. Після розширення коло потенційних резидентів зросло в кілька разів, адже R&D-діяльність здійснюють компанії у військовій, фармацевтиці, біотехнологіях, інжинірингу, автомобілебудуванні, матеріалознавстві, енергетиці, медицини та оборонних технологіях.

Дослідження, проведене серед резидентів і потенційних резидентів Дія.Сіті [6] , демонструє високий рівень задоволеності правовим режимом та підтверджує його значний вплив на розвиток технологічного бізнесу, особливо малого та середнього. Понад половина респондентів (52 %) повністю задоволені перебуванням у режимі, а ще 46,2 % оцінюють свій досвід як переважно позитивний, що свідчить про стійку довіру до інституційної моделі. Аналіз часу приєднання вказує на те, що найбільш активна хвиля зростання резидентів припала на 2023–2024 роки, коли компанії побачили зниження ризиків і стабілізацію правозастосовної практики. При цьому 76 % опитаних представляють усталений бізнес, а 24 % — стартапи, що свідчить про універсальність моделі для компаній різного масштабу.

Окремим ключовим результатом є те, що 79,5 % компаній ведуть діяльність виключно в межах Дія.Сіті, а ще 11,7 % — понад 70 %. Це означає не просто формальне резидентство, а глибоку інтеграцію бізнес-процесів у спеціальний правовий режим. Компанії активно використовують його можливості, що підтверджує ефективність конструкції режиму як довгострокової моделі функціонування технологічних підприємств.

Респонденти високо оцінили переваги, які стали для них визначальними при приєднанні: пільгові ставки оподаткування (94,2 %), гарантії стабільності на 25 років (71,3 %), можливість укладати гіг-контракти (65,5 %) та швидкість отримання статусу резидента (46,2 %). Водночас уже після



Рисунок 1 – Тип бізнесу та дата приєднання до Дія.Сіті [6]
Figure 1 – Business type and date of joining Diya.City [6]

вступу компанії зазначають, що найбільш затребуваною перевагою в реальній роботі є застосування гіг-контрактів, адже це забезпечує гнучкість трудових відносин без переведення їх у тінь.

Окремо слід відзначити секторальну динаміку: резидентами стають не лише IT-компанії, але й підприємства у сферах MilTech, робототехніки, виробництва технологічних продуктів, освіти, маркетингу, цифрової техніки та R&D. Це підтверджує розширення моделі «Дія.Сіті» у напрямі



Рисунок 2 – Мотивація стати резидентом Дія.Сіті [6]
Figure 2 – Motivation to become a resident of Diya.City [6]

національної інноваційної екосистеми, а не вузького IT-кластера. Понад 33 % потенційних резидентів розглядають можливість приєднання найближчим часом, але 23 % компаній відмовилися через критерії — переважно щодо кількості спеціалістів і рівня зарплат.



Рисунок 3 – Секторальна структура резидентів Дія.Сіті [6]
Figure 3 – Sectoral structure of residents of Diya.City [6]

Понад половина респондентів повністю задоволені перебуванням у Дія.Сіті, а майже всі інші оцінюють досвід позитивно, що свідчить про сформовану довіру до інституційної моделі та її сприйняття як стабільного середовища для ведення діяльності. Компанії не лише формально набувають статус резидента, а й глибоко інтегрують свої бізнес-процеси у режим: майже 80 % ведуть операційну діяльність виключно в його межах. Це свідчить про зміцнення ролі Дія.Сіті як практичного механізму оптимізації податкового навантаження, оформлення трудових відносин та захисту інтелектуальної власності.

Податкові стимули залишаються основним мотиватором для приєднання бізнесу: 94 % компаній називають їх ключовою перевагою, а понад 59,6 % фактично застосовують поадаток на виведений капітал. Значний попит на гіг-контракти підтверджує, що Дія.Сіті сприяє детінізації ринку праці та переходу від моделі масового використання ФОП до цивілізованих трудових форм. Це важливо для збереження трудових ресурсів, оскільки гнучкі й легальні моделі співпраці знижують стимули до міграції фахівців та підвищують привабливість українського ринку праці в умовах глобальної конкуренції.

Дослідження також засвідчує структурне розширення сфери застосування режиму: окрім IT-компаній, резидентами дедалі частіше стають фірми у сферах робототехніки, оборонних технологій, освіти, цифрового маркетингу, виробництва технологічних продуктів та досліджень і розробок. Це свідчить про еволюцію Дія.Сіті у національний інноваційний кластер, що виходить за межі програмної інженерії та може слугувати платформою для розвитку економіки знань.

За даними Державної податкової служби [8], протягом восьми місяців 2025 року 2 318 діючих резидентів режиму «Дія.Сіті» сплатили до зведеного бюджету 19,5 млрд грн податків. Це на 81 % (8,7

млрд грн) більше, ніж за аналогічний період попереднього року, коли 1 339 резидентів забезпечили надходження на рівні 10,8 млрд грн.

Структура податкових надходжень у 2025 році має такий вигляд:

- податок і військовий збір із доходів фізичних осіб — 9,9 млрд грн (51 %);
- податок на додану вартість — 6,4 млрд грн (33 %);
- податок на прибуток підприємств — 3,2 млрд грн (16 %).

Станом на серпень 2025 року у Реєстрі нараховується понад 2,8 тис. компаній, з яких 2,4 тис. є активними резидентами.

Зростання обсягів бюджетних надходжень від резидентів «Дія.Сіті» у 2025 році безпосередньо пов'язане з розширенням переліку кваліфікованих видів діяльності, що охопили не лише IT-сферу, а й інжинірингові, науково-дослідні (R&D), виробничо-технологічні та оборонно-технічні напрями. Розширення критеріїв допуску дозволило долучитися до режиму високотехнологічним компаніям із традиційно більшими фондами оплати праці та значними обсягами операційної діяльності. Саме R&D, MilTech- та інжинірингові підприємства мають високий рівень винагороди спеціалістів, що зумовлює суттєве зростання надходжень ПДФО та військового збору. Отже, секторальна диверсифікація стала ключовим чинником стрімкого збільшення податкової бази.

Другим вагомим чинником приросту є трансформація моделі зайнятості: поступовий перехід від співпраці з ФОП до гіг-контрактів та інших форм офіційного працевлаштування. Пільгова ставка податку на доходи фізичних осіб (5 % ПДФО + 5 % військовий збір) формує стимул для нарахування зарплат «у білу» та знижує зацікавленість у використанні тіньових схем. Це веде до зростання як кількості резидентів, так і середнього податкового внеску на одну компанію, що частково пояснює 81-відсотковий приріст податкових надходжень. Водночас формується прозорий та конкурентний ринок технологічної праці.

Крім того, позитивна динаміка відображає зростаючу інституційну довіру бізнесу до режиму «Дія.Сіті», який демонструє стабільність регуляторних умов, податкові стимули, застосування податку на виведений капітал, спрощену процедуру резидентства та гарантії незмінності правил протягом 25 років. Це створює сприятливі умови для масштабування діяльності ММСП, реінвестування прибутку та нарощування кадрового потенціалу. Подальший ефект посилюється зростанням кількості учасників: досягнення позначки у 2,4 тис. активних резидентів формує мережеві синергії, стимулює розвиток внутрішнього ринку високотехнологічних послуг та підсилює глобальну конкурентоспроможність України.

Висхідна динаміка кількості резидентів та обсягів сплачених ними податків свідчить, що продумані інституційні стимули здатні не лише прискорювати розвиток високотехнологічної економіки, але й формувати зріле, правове та доброчесне середовище ведення бізнесу. «Дія.Сіті» пропонує прозору та передбачувану систему оподаткування, яка усуває необхідність використання схем мінімізації податкових зобов'язань, що раніше були типовими для технологічного сектору. Легальна модель взаємодії бізнесу й працівників сприяє підвищенню економічної довіри, формує культуру відповідального оподаткування та створює підґрунтя для сталого розвитку.

У контексті повоєнного відновлення значення даної моделі суттєво зростає, оскільки вона сприяє поверненню вимушених переселенців та ефективній реінтеграції ветеранів у цивільний ринок праці. Розвиток гнучких форм зайнятості, стимулювання легального працевлаштування та підвищення рівня офіційної оплати праці створюють умови, за яких повернення до України стає економічно доцільним та соціально безпечним. Особи, які виїхали через воєнні дії або втратили роботу, отримують можливість відновити економічну активність у структурованому, нормативно врегульованому бізнес-середовищі без залучення до тіньових механізмів.

Для ветеранів запропонована модель може виступати інструментом сталого професійного переходу, оскільки формує робочі місця у секторах, де високо цінуються дисципліна, відповідальність, технічні компетентності, здатність працювати в команді та менеджерський потенціал. Поєднання спрощених процедур започаткування підприємницької діяльності з прозорою податковою системою

створює умови для започаткування власних проєктів без надмірних регуляторних бар'єрів чи фіскального тиску.

Загалом масштабування позитивних практик «Дія.Сіті» на інші сегменти малого та середнього підприємництва може забезпечити стратегічний ефект: від підвищення рівня зайнятості та повернення людського капіталу до зменшення тінізації економіки та формування культури відповідального оподаткування. Це дозволяє одночасно зміцнювати фіскальну систему, підтримувати розвиток високотехнологічних галузей та вибудовувати соціально орієнтовану економічну модель, релевантну викликам повоєнної відбудови України.

Позитивна динаміка зростання кількості резидентів «Дія.Сіті» та обсягів сплачених ними податків підтверджує, що ефективно сконструйовані інституційні стимули здатні не лише активізувати розвиток високотехнологічного сектору, але й формувати більш цивілізовану модель господарювання. Режим пропонує прозору, передбачувану та конкурентну систему оподаткування, яка усуває потребу у схемах мінімізації податкового навантаження, характерних для попередніх моделей співпраці у технологічній сфері. Функціонування у правовому полі без фіскальних ризиків та регуляторної невизначеності формує бізнес-середовище, орієнтоване на доброчесність, довіру та довгостроковий розвиток.

Для ветеранів режим «Дія.Сіті» та інші подібні стимулюючі моделі можуть стати дієвим інструментом стабільної професійної адаптації, оскільки сприяють формуванню робочих місць у секторах, де особливо цінуються дисципліна, відповідальність, технічні компетентності та здатність працювати в команді. Спрощені механізми започаткування малого бізнесу у поєднанні з прозорою системою оподаткування надають ветеранам можливість реалізовувати власні підприємницькі ініціативи без ризику зіткнутися з непрозорими регуляторними вимогами або надмірним фіскальним тиском.

Узагальнюючи, масштабування позитивних практик режиму «Дія.Сіті» на інші сегменти малого підприємництва може забезпечити стратегічний макроекономічний ефект: від підвищення рівня зайнятості та повернення людського капіталу до скорочення тінізації економіки та формування культури відповідального ведення бізнесу. Це створює умови для одночасного зміцнення фіскальної системи, розвитку високотехнологічних галузей та побудови соціально орієнтованої моделі економічного зростання, релевантної викликам повоєнної відбудови України.

Умови набуття статусу резидента «Дія.Сіті» для діючих компаній і стартапів передбачають поєднання чітко визначених формальних критеріїв і більш гнучких елементів оцінювання. До кількісних показників належать вимоги щодо середньої винагороди не нижче еквівалента 1200 євро та наявності мінімум дев'яти працівників або гіг-спеціалістів у звітному періоді. Ці параметри мають уніфіковані методики перевірки через податкову та фінансову звітність, що мінімізує простір для суб'єктивного трактування та підвищує прозорість процедури резидентства. Для стартапів також чітко регламентовано критерії річного доходу (до 8,3 млн грн) та строку діяльності — не більше 24 місяців до моменту подання заяви.

Водночас поряд із формалізованими умовами значну роль відіграє підтвердження відповідності компанії кваліфікованим видам діяльності, а також структури кваліфікованого доходу, частка якого має становити не менше 90 % від загального обсягу надходжень. Саме на цьому етапі з'являється потенційний простір для неоднозначності, оскільки визначення належності конкретних господарських операцій до кваліфікованих напрямів іноді потребує правової експертизи, спеціалізованих роз'яснень або додаткових підтверджувальних документів. Таким чином, режим поєднує регуляторну чіткість із можливістю гнучкого тлумачення, що водночас розширює доступ до резидентства та висуває додаткові вимоги до юридичної відповідності бізнес-процесів.

Однією з ключових регуляторних проблем режиму «Дія.Сіті» є відсутність чіткої кореляції між визначеними законом кваліфікованими видами діяльності та чинною системою КВЕД (рис. 4), що використовується в Україні як основний інструмент класифікації господарських операцій і податкового

регулювання. Значна частина напрямів, що формально належать до кваліфікованих (зокрема, кіберспорт, розроблення рішень для міжнародних платіжних систем, виробництво біонічних протезів, робототехніка), не мають окремих КВЕД-кодів або ж їх формулювання в законодавстві про «Дія.Сіті» не відповідають чинним класифікаційним групам.

За таких умов підприємства вимушені одночасно відповідати нормам спеціального закону та загальним вимогам податкового обліку, що інколи технічно неможливо, оскільки діяльність може відповідати умовам резидентства, але не підпадати під конкретний код економічної класифікації. Як наслідок, виникає простір для оціночного трактування зі сторони контролюючих органів щодо визначення частки кваліфікованого доходу, що підвищує регуляторні ризики та створює додаткове адміністративне навантаження на бізнес.

Невідповідність між спеціально визначеними видами діяльності режиму «Дія.Сіті» та класифікацією за КВЕД формує потенційні регуляторні ризики, зокрема під час податкових перевірок. У разі наявності різночитань податкові органи можуть поставити під сумнів окремі операції підприємства, трактуючи їх як такі, що не належать до кваліфікованих видів діяльності. Це створює для резидентів низку загроз, серед яких:

- втрата статусу резидента «Дія.Сіті»;
- донарахування податкових зобов’язань за загальною системою;
- штрафні санкції за нібито некоректну кваліфікацію доходів;
- спори щодо правомірності застосування гіг-контрактів і спеціального режиму оподаткування.

В окремих випадках така нормативна невизначеність може створювати передумови для зловживань з боку контролюючих органів, які використовують нечіткість законодавства як інструмент тиску на бізнес або формального фіксування «порушень». Профільні юридичні компанії вже фіксують випадки, коли під час перевірок інспектори вимагали додаткові пояснення або тлумачили допустимі види діяльності у спосіб, що суперечить змісту Закону № 1667-IX.



Рисунок 4 – Перелік видів діяльності, за якими можна стати резидентом простору та орієнтовні КВЕД.

Figure 4 – List of activities for which you can become a resident of the space and approximate KVED.

За таких умов особливо актуальним є завдання нормативної гармонізації класифікації КВЕД із переліком кваліфікованих видів діяльності для резидентів «Дія.Сіті». Така гармонізація може бути реалізована шляхом:

- запровадження окремих КВЕД-кодів для напрямів, передбачених режимом;
- уніфікації формулювань класифікатора з термінами, визначеними спеціальним законом;
- розроблення офіційних роз'яснень щодо віднесення конкретних операцій до кваліфікованих доходів;
- створення узгоджених методичних рекомендацій і чек-листів для податкових перевірок.

Забезпечення методологічної відповідності між системою КВЕД і переліком кваліфікованих видів діяльності є передумовою зниження регуляторних ризиків, мінімізації можливостей для адміністративного тиску та забезпечення стабільного функціонування режиму «Дія.Сіті» як інструменту стимулювання розвитку ММСП і підвищення їхньої конкурентоспроможності у глобальній цифровій економіці.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвиток у даному напрямі. Проведений аналіз доводить, що спеціальний правовий режим «Дія.Сіті» став одним із найефективніших сучасних інструментів стимулювання розвитку мікро-, малих та середніх підприємств у високотехнологічних секторах економіки. Його запровадження збіглося з критичним періодом посиленої конкуренції за трудові ресурси, активної міграції кваліфікованих фахівців та необхідності швидкої адаптації українського бізнесу до умов воєнної та поствоєнної трансформації. Результати досліджень, зокрема опитування резидентів «Дія.Сіті», свідчать про високий рівень задоволеності механізмом, глибоку інтегрованість бізнес-процесів у правовий режим і позитивний вплив на формальну зайнятість, інноваційну активність та податкову дисципліну.

Секторальне розширення режиму у 2025 році, яке охопило R&D, MilTech, інжинірингові, біотехнологічні та інші технологічні напрями, стало ключовим чинником прискорення динаміки резидентства та зростання податкових надходжень. У результаті цього бюджет отримав суттєве збільшення надходжень: лише за перші вісім місяців 2025 року резиденти перерахували 19,5 млрд грн, що на 81 % більше, ніж у відповідному періоді 2024 року. Така динаміка підтверджує здатність режиму формувати високодохідну та офіційну зайнятість, зміцнювати інституційну довіру бізнесу та створювати мультиплікативний ефект для суміжних секторів.

Важливим результатом функціонування режиму стала трансформація моделей співпраці у високотехнологічному секторі: поширення гіг-контрактів та відмова від надмірної залежності від ФОП-моделі сприяли детінізації ринку праці, зменшенню ризиків фіскального тиску та формуванню більш цивілізованої практики ведення бізнесу. Це забезпечує кращий соціальний захист спеціалістів і створює конкурентні умови для залучення та утримання кадрів в Україні.

Окремої уваги потребують виклики, пов'язані з відсутністю гармонізації між кваліфікованими видами діяльності та чинною системою КВЕД, що створює ризики різночитань під час податкових перевірок. Усунення цих невідповідностей є критично важливим для подальшої стабільності режиму та запобігання можливим зловживанням з боку контролюючих органів. Також необхідне удосконалення критеріїв резидентства та розширення методичних роз'яснень, що дозволить підвищити доступність режиму для ширшого кола ММСП.

У ширшому соціально-економічному контексті режим «Дія.Сіті» може відіграти ключову роль у процесах повоєнного відновлення, зокрема у реінтеграції ветеранів, поверненні вимушених переселенців, формуванні високопродуктивних робочих місць і відновленні українського людського капіталу. Гнучкі моделі зайнятості, конкурентні податкові умови та сучасна цифрова інфраструктура створюють можливості для запуску малого бізнесу ветеранами та стимулюють повернення фахівців, які тимчасово перебувають за кордоном.

Загалом, досвід функціонування «Дія.Сіті» демонструє, що впровадження сучасних цифрових режимів розвитку підприємництва може суттєво підсилити ММСП, забезпечити їх інтеграцію у глобальні ланцюги створення вартості та підвищити конкурентоспроможність національної економіки. Масштабування позитивних практик цього режиму на інші сегменти малого бізнесу — логічний крок,

що дозволить не лише збільшити рівень зайнятості, але й скоротити тінізацію, розширити інноваційний потенціал та створити довгострокові передумови для сталого економічного зростання України.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на поглиблене вивчення впливу спеціальних правових режимів на структуру зайнятості та динаміку відтворення трудового потенціалу в умовах повоєнної відбудови України. Особливо актуальним є оцінювання того, якою мірою цифрові інструменти стимулювання підприємництва здатні сприяти поверненню вимушених переселенців і підвищенню привабливості українського ринку праці для висококваліфікованих кадрів. Важливим напрямом є також дослідження інтеграційних ефектів, які виникають унаслідок поширення високотехнологічних бізнес-моделей на суміжні галузі економіки, та визначення потенціалу масштабування таких режимів на ширший спектр ММСП.

Перспективним є проведення міждисциплінарних досліджень, що поєднують економічний, правовий і соціологічний аналіз для оцінювання довгострокових наслідків застосування гіг-контрактів, податкових стимулів та інституційних гарантій. Значний дослідницький інтерес становлять питання гармонізації класифікації економічних видів діяльності, удосконалення механізмів податкового контролю та розроблення прозорих критеріїв для визначення кваліфікованого доходу. Окремої уваги потребує вивчення ролі стимулюючих правових режимів у процесах адаптації та професійної реінтеграції ветеранів, оцінювання соціальних ефектів легалізації зайнятості та можливостей розвитку підприємництва для уразливих груп населення в умовах цифрової трансформації економіки.

Перелік посилань

1. Дикань В. В., Фролова Н. Л. Напрями та інструменти державної підтримки розвитку малого та середнього бізнесу в Україні у воєнний час // *Економіка та суспільство*. – 2022. – № 38. – Режим доступу: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1309 (дата звернення: 17.11.2025). – DOI: 10.32782/2524-0072/2022-38-56.

2. Сімків Л. Є., Чорний П. П. Інструменти державної підтримки малого та середнього бізнесу в Україні в умовах воєнного стану // *Науковий вісник ІФНТУНГ. Серія: Економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості*. – 2024. – № 1. – С. 61–72. – Режим доступу: http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/9583 (дата звернення: 17.11.2025).

3. Кручиненко В. А. Фінансовий механізм державної підтримки розвитку малого підприємництва // *Вісник НУЦЗ України. Серія: Державне управління*. – 2018. – Вип. 1(8). – С. 522–530. – Режим доступу: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/14247/1/Kruchynenko118.pdf (дата звернення: 17.11.2025).

4. Устінов Я. В. (2025). *Порівняльний аналіз податкових режимів: ФОП 3-ї групи та "Дія.Сіту" як фінансові інструменти стимулювання розвитку IT-індустрії в Україні.* Підприємництво і право, №2. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ppeu.stu.cn.ua/article/download/335138/324051.

5. Тімашов В. О., Гейко Н. Є. *Правові засади забезпечення «Дія.Сіті» // Юридичний науковий електронний журнал. – 2023. – № 5. – С. 262–264. – DOI:* 10.32782/2524-0374/2023-5/65.*: http://lsej.org.ua/5_2023/65.pdf*

6. OECD. Enhancing Resilience by Boosting Digital Business Transformation in Ukraine. – 2024. – Режим доступу: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/05/enhancing-resilience-by-boosting-digital-business-transformation-in-ukraine_c2e06e50/4b13b0bb-en.pdf (дата звернення: 17.11.2025).

7. Про стимулювання розвитку цифрової економіки в Україні : Закон України від 15.07.2021 р. № 1667-IX. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1667-20 (дата звернення: 17.11.2025).

8. Державна податкова служба України. Резиденти Дія.Сіті сплатили 19,5 млрд грн податків за вісім місяців 2025 року. *Офіційний вебсайт ДПС України*. URL: https://tax.gov.ua/media-tsentr/novini/932096.html (дата звернення: 20.11.2025).

MECHANISMS FOR STIMULATING THE DEVELOPMENT OF SMALL HIGH-TECH ENTERPRISES IN THE CONTEXT OF GLOBAL COMPETITION FOR LABOUR RESOURCES.

Mateiashchuk Bogdan M., postgraduate, National Transport University, Kyiv, Ukraine, mateiashchuk@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-8861-019X

Abstract. This article examines the mechanisms for stimulating the development of small high-tech enterprises in Ukraine amid intensified global competition for labour resources. It highlights the role of modern digital legal regimes that integrate tax incentives, flexible employment tools and institutional safeguards, thereby strengthening the competitiveness of micro, small and medium-sized enterprises (MSMEs). In the context of wartime economic disruption and large-scale labour migration, such instruments become essential for retaining skilled personnel and restoring the country's human capital.

The study analyses the economic, legal and organizational mechanisms that influence employment, investment attractiveness and business activity in the high-tech sector. Particular emphasis is placed on the effects of sectoral expansion—especially the integration of R&D, MilTech and engineering activities—which has led to an increase in the number of resident companies and tax revenues. Statistical evidence demonstrates growing formal employment and a gradual transition from individual contractor schemes to gig contracts, improving tax transparency and compliance.

The article also identifies challenges related to inconsistencies between qualified activities and the national KVED classification system, underscoring the need for regulatory harmonization. The practical value of the research lies in outlining directions for enhancing state support for MSMEs, including expanding successful digital regimes, encouraging the return of displaced workers and facilitating veteran reintegration. The findings show that well-designed digital frameworks can reduce informality, stimulate innovation and strengthen Ukraine's economic resilience.

Keywords: micro, small and medium-sized enterprises (msmes); special legal regimes; digital economy; innovation activity; tax incentives; employment de-shadowing; r&d; business competitiveness.

References

1. Dykan, V. V., & Frolova, N. L. (2022). Directions and tools of state support for the development of small and medium-sized businesses in ukraine during wartime. *Economics and Society*, (38).Available at: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1309 (accessed: 17 November 2025).DOI: 10.32782/2524-0072/2022-38-56.

2. Simkiv, L. Ye., & Chornyi, P. P. (2024). Instruments of state support for small and medium-sized businesses in Ukraine under martial law. *Scientific Bulletin of IFNTUOG. Series: Economics and Management in the Oil and Gas Industry*, (1), 61–72.Available at: http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/9583 (accessed: 17 November 2025).

3. Kruchynenko, V. A. (2018). Financial mechanism of state support for small enterprises development. *Bulletin of NUCZ of Ukraine. Series: Public Administration*, 1(8), 522–530.Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/14247/1/Kruchynenko118.pdf (accessed: 17 November 2025).

4. Ustinov, Ya. V. (2025). Comparative analysis of tax regimes: Sole Proprietors of Group 3 and the "Diia.City" model as financial instruments for stimulating the development of the IT industry in Ukraine. *Entrepreneurship and Law*, (2).Available at: https://ppeu.stu.cn.ua/article/download/335138/324051 (accessed: 17 November 2025).

5. Timashov, V. O., & Heiko, N. Ye. (2023). Principles of legal support of "diia.city" project. *Legal Scientific Electronic Journal*, (5), 262–264.DOI: 10.32782/2524-0374/2023-5/65.Available at: http://lsej.org.ua/5_2023/65.pdf

6. OECD (2024). *Enhancing Resilience by Boosting Digital Business Transformation in Ukraine*.Available at: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/05/enhancing-

resilience-by-boosting-digital-business-transformation-in-ukraine_c2e06e50/4b13b0bb-en.pdf (accessed: 17 November 2025).

7. Law of Ukraine “On Stimulating the Development of the Digital Economy in Ukraine” № 1667-IX, adopted 15 July 2021.Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1667-20 (accessed: 17 November 2025).

State Tax Service of Ukraine. (2025). Diia.City residents paid UAH 19.5 billion in taxes over the first eight months of 2025. *Official website of the State Tax Service of Ukraine.*Available at: https://tax.gov.ua/media-tsentr/novini/932096.html (accessed: 20 November 2025)

УДК 330.33/.36
UDC 330.33/.36
DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-274-295

БІЗНЕС МОДЕЛЬ ЯК ЕЛЕМЕНТ СТАЛОГО РОЗВИТКУ: ПЕРЕОСМИСЛЕННЯ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ БІЗНЕС-МОДЕЛІ ПІДПРИЄМТСВ

BUSINESS MODEL AS AN ELEMENT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT: RECONSIDERING THE PRINCIPLES OF BUSINESS MODEL ENTERPRICE CONSTRUCTION



Шпиг Альона Юріївна, *кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: alena-87@ukr.net, тел. +380988123982*

https://orcid.org/0000-0002-6909-7088



Добжанська Ліана Юріївна, *аспірант Національного транспортного університету, м. Київ, України, e-mail: dobzhanska@gmail.com, тел. +380675851145.*

https://orcid.org/0009-0003-6313-142X

Анотація: У статті розглянуто питання яким чином інноваційна бізнес-модель стає інструментом сталого розвитку. З цією метою досліджено питання трансформації бізнес-моделі у інноваційну, в який момент та за рахунок чого вона стає інноваційною. Проведено порівняння елементів декількох бізнес-моделей (до та після їх трансформації), які визнані інноваційними та оцінено їх на відповідність критеріям сталого розвитку. В результаті встановлено співвідношення елементів бізнес-моделі та умов сталого розвитку, що проявило які саме управлінські рішення здатні модифікувати бізнес-модель у інноваційну зі сталим розвитком.

Ключові слова: бізнес-модель, інновації, інноваційна бізнес-модель, сталий розвиток, управлінське рішення, виклики сучасності, ціннісна пропозиція, концепції конкурентоспроможності, інновація цінності, елементи бізнес-моделі, майбутні пріорітети споживачів, трансформація.

Вступ. У сучасних умовах економічної трансформації, зростаючих екологічних та епідеміологічних викликів, соціальної нестабільності, війн та впливу новітніх технологій, особливої актуальності набуває необхідність переосмислення традиційних підходів до ведення бізнесу, відповідно і принципів побудови бізнес-моделей підприємств. Сучасне підприємство має не лише генерувати прибуток, але й функціонувати в межах концепції сталого розвитку.

Сталий розвиток все більше стає домінуючим питанням у бізнес-програмі підприємств у всьому світі. Зацікавлені сторони, такі як клієнти, інвестори, партнери та регулюючі органи, все частіше вимагають, щоб підприємства приділяли увагу стійкості. Підприємства також усвідомлюють,

що нові можливості, які ґрунтуються на стійкості, можуть створити конкурентні переваги. Відповідно, підприємства все частіше прагнуть стати більш стійкими та адаптивними, але не завжди усвідомлюють як цього досягнути.

Концепція сталого розвитку передбачає баланс економічної, соціальної та екологічної складових. Ряд міжнародних та українських дослідників все більше пов'язують концепцію сталого розвитку із інноваційними бізнес-моделями.

Метою статті **є** вивчення сутності «інноваційна бізнес-модель», її ключових відмінностей від традиційних бізнес-моделей підприємств та з'ясування, за рахунок чого «інноваційна бізнес-модель» стає механізмом реалізації концепції сталого розвитку**.** Наявність такої інформації сприятиме більшому розумінню як підприємство може реалізувати концепцію сталого розвитку та стати більш адаптивним у сучасному швидкозмінному середовищі.

Виклад основного матеріалу. ***Що таке бізнес модель, її ключові особливості та цінність***. За останні 20 років дослідження поняття «бізнес-модель» набуло значної популярності як серед вітчизняних так і іноземних науковців. Проте, кількість визначень цього поняття продовжує збільшуватися. Позиції вчених є досить неоднозначними та дискусійними. Н. Фосс, Т. Сойса, І. Чухрай досліджують бізнес-модель як інструмент управління. Стратегічні аспекти відображені в працях Рамон Касадесус-Масанель, Джоан Е. Рікарт, П. Кін, С. Куреші, М. Леві, Г. Гемел. Клієнтоорієнтований підхід прослідковується в працях А. Сливотскі, К. Цотт. У таблиці 1 наведено тільки деякі визначення «бізнес-моделі».

Таблиця 1 – Визначення сутності терміну бізнес-модель у науковій літературі
Table 1 – Definition of the term business model core in scientific literature

Автор	Визначення
Морріс М. [1]	Відображення сукупності взаємозв'язаних змінних рішень в області стратегії підприємства, їх архітектур, і економічні характеристики, для створення життєздатної переваги товару або компанії на певних ринках.
Раппа М. [2]	Бізнес-модель – це метод здійснення бізнесу, за допомогою якого компанія отримує прибуток. Бізнес-модель дозволяє описати механізм створення доходу компанією та визначити її місце в ланцюжку створення цінності.
Остервальдер А., Піньє І. [3]	Бізнес-модель – це логіка того, як організація створює, доставляє та отримує цінність. Бізнес-модель – це концептуальний інструмент, що складається з певних елементів і дозволяє висловити бізнес логіку конкретної фірми за допомогою їх взаємозв'язків.
Чесбро Г. [4]	Бізнес-модель – це спосіб, яким компанія створює та захоплює цінність із технологій. Бізнес-модель – це метод, який компанія використовує для створення цінності та прибутку.
Тіс, Д. Дж. [5]	Бізнес-модель описує, як підприємство створює, доставляє і захоплює цінність. Бізнес-модель описує дизайн або архітектуру механізмів створення, доставки та захоплення цінності, які використовує компанія. Суть бізнес-моделі полягає у визначенні способу, за допомогою якого підприємство надає цінність клієнтам, спонукає клієнтів платити за цінність та перетворює ці платежі на прибуток.

Створено авторами статті на основі цитат авторів зазначених теорій

Дослідження Рамон Касадесус-Масанель та Джоан Е. Рікарт [6] показують, що одним із компонентів бізнес-моделі має бути вибір, який керівники та власники (оскільки саме вони наймають

їх з необхідними якостями та рівнем професіоналізму) роблять стосовно того, як повинна функціонувати організація. Це такий вибір, як практика компенсації, контракти на закупівлю, розташування об'єктів, ступінь вертикальної інтеграції, ініціативи з продажу та маркетингу тощо. Управлінський вибір, звичайно, має наслідки. Ці наслідки впливають на логіку компанії щодо створення та захоплення цінності, відповідно вони також повинні мати місце у визначенні. Тому, у своїй найпростішій концептуалізації, бізнес-модель також складається з набору управлінських рішень та наслідків цих рішень.

Рамон Касадесус-Масанель та Джоан Е. Рікарт [6] зазначили: «Стратегія була основним будівельним блоком конкурентоспроможності протягом останніх трьох десятиліть, але в майбутньому пошук стійкої переваги цілком може розпочатися з бізнес-моделі». Чому так?

Якщо уявити бізнес-модель у чотирьох вимірах, вона виглядає так: клієнт (хто), ціннісна пропозиція (що), ланцюжок створення вартості (як) і механізм генерування доходу (чому). Деталізуючи ці виміри **за Остервальдер О.** [7], **бізнес-модель розкладається на наступні елементи:**

- *Ключові партнери* – визначають, які партнерства компанія використовує для покращення своєї діяльності. Це сторонні компанії, які виконують непрофільні для компанії роботи або постачають ресурси. Це ті компанії, без яких бізнес не зміг би ефективно функціонувати.
- *Ключова діяльність* – описує ключові види діяльності, які компанія виконує для досягнення своєї цілі.
- *Ключові ресурси* – визначають, які ресурси (фінансові, людські, технічні) компанія використовує для реалізації бізнес-моделі.
- *Витратна структура* – описують структуру витрат компанії, включаючи різні види витрат (наприклад, витрати на виробництво, витрати на маркетинг).
- *Цінність (пропозиція цінності)* – описує, які цінності, переваги отримує клієнт від продукту або послуги, а також які проблеми компанія вирішує для клієнта.
- *Цільова аудиторія* – визначають, для кого створюється продукт або послуга, а також які клієнти є найбільш цінними.
- *Стосунки з клієнтами* – визначають, які види взаємодії (наприклад, особисті, автоматизовані, самообслуговування) компанія використовує з клієнтами.
- *Канали збуту* – визначають, як компанія доставляє цінність клієнту, та як забезпечує комунікацію з клієнтами. Можна створити ідеальний продукт, який, безсумнівно, потрібен ринку, проте якщо не налагоджені канали збуту, все інше не має значення.
- *Потоки доходу* – описують, як компанія отримує прибуток від своєї діяльності, включаючи різні джерела доходу (наприклад, продаж товарів, підписки, реклама).

Марк Джонсон [8] виділяє лише 4 основні **елементи бізнес-моделі**:

- *Ціннісна пропозиція* – які проблеми вона вирішує або які потреби задовольняє, відповідає на питання чому клієнт обирає саме цю компанію.
- *Прибуткова формула* – логіка того, як компанія генерує прибуток. Описує, як ціннісна пропозиція перетворюється на прибутковий бізнес – тобто, як дохід, витрати, структура маржі та обсяг продажів взаємодіють для досягнення прибутку.
- *Ключові ресурси* – відповідає на запитання «як» компанія реалізовує свою ціннісну пропозицію. До них він відносить: люди, технології, інформація, партнерства, канали, бренд і продукти, які необхідні для функціонування бізнес-моделі. Їхній склад залежить від обраної ціннісної пропозиції та цільової аудиторії.
- *Ключові процеси* – це дії, які дають змогу ефективно використовувати ключові ресурси для доставки цінності клієнтам. До них він відносить: операційні та управлінські дії, правила, метрики та норми, що дозволяють бізнес-моделі працювати стабільно та масштабуватися.

За думкою Рамон Касадесус-Масанель та Джоан Е. Рікарт такі описи бізнес-моделей, безсумнівно, допомагають керівникам оцінювати їх, але вони нав'язують упередження щодо того, як вони повинні виглядати, і можуть обмежувати розробку радикально інших. Але вважаю, що для

порівняння та з'ясування якості логіки бізнесу, модель за Остервальдер О. найкраща, оскільки вона вдало структурує та систематизує бізнес.

Гассман О., Франкенбергер К., Цик М. [9] пропонують просте, але вичерпне визначення, сформульоване ними для опису бізнес-моделей. Спрощену систему набагато раціональніше використовувати як робочий інструмент, а не засіб систематизації. Вона розроблена для «стирання» упереджень, які можуть обмежувати у створенні нових радикальних проривних ідей. Її елементи відображені у таблиці 2, де вони співставленні з елементами бізнес-моделей зазначених вище науковців.

Визначаючи хто – що – як – чому, бізнес-модель дає можливість побачити цілісну картину, з якої зрозуміло, яким чином компанія створює та нарощує вартість, цінність, які підходи до ведення бізнесу вона застосовує.

Таблиця 2 – Співставлення елементів бізнес-моделей за різними підходами
Table 2 – Comparison of business models elements using different approaches

Елемент бізнес-моделі за Гассман О., Франкенбергер К., Цик М.	Елемент бізнес-моделі Марк Джонсон	Елемент бізнес-моделі за Остервальдер О., Піньє І.
Клієнт – хто цільові клієнти компанії? Важливо точно розуміти, на які споживчі сегменти потрібно націлюватися, і які будуть або не будуть охоплені бізнес-моделлю. В основі будь-якої бізнес-моделі завжди є клієнт. У цьому правилі немає винятків.	-	Цільова аудиторія
Ціннісна пропозиція – що компанія пропонує клієнтам? Цей вимір включає визначення пропозиції вашої компанії (товарів і послуг) і опис того, як компанія задовольняє потреби цільових покупців.	Ціннісна пропозиція	Цінність (пропозиція цінності)
Ланцюжок створення вартості - як компанія створює свої продукти? Щоб реалізувати ціннісну пропозицію, необхідно виконати низку процесів та дій. Зазначені процеси та дії у поєднанні з відповідними ресурсами та засобами, а також їх розподіл за ланцюжком створення вартості складають цей вимір бізнес-моделі.	Ключові ресурси Ключові процеси	Ключові партнери Ключова діяльність Ключові ресурси Стосунки з клієнтами Канали збуту
Механізм отримання прибутку – чому компанія генерує прибуток? Це вимір, що включає такі аспекти, як структури витрат і механізми генерування виручки, розкриває, що робить бізнес-модель фінансово життєздатною. Він дає відповідь на головне питання, яке слід поставити будь-якій компанії: чому бізнес-модель ефективна з комерційної точки зору.	Прибуткова формула	Потоки доходу Витратна структура

Створено авторами статті

Кожен елемент бізнес-моделі лише верхівка айсберга. Він несе в собі набір різноманітних інструментів та підходів, які застосовуються для реалізації логіки бізнесу, генерування та захоплення цінності.

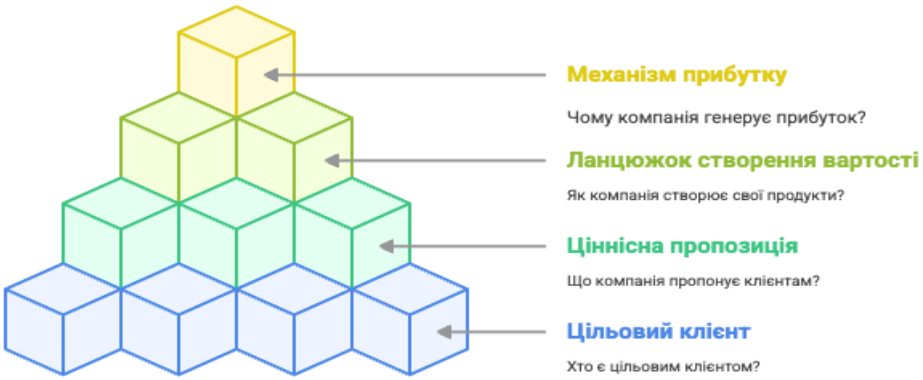


Рисунок 1 – Піраміда бізнес-моделі
Figure 1 – The business model pyramid

З урахуванням розглянутих визначень суті бізнес-моделей можна сказати, що вона являється фундаментальною логічною системою, скелетом бізнесу компанії, створеного власниками та керівниками підприємств через управлінські рішення під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів. Ця система має свої підходи, характеристики, елементи та інструменти.

Ключовою особливістю бізнес-моделі є її адаптивність. Звісно, сама по собі ця адаптивність не відбувається, потрібна системна робота керівників в цьому напрямі. Але у випадку виникнення нових викликів та з метою забезпечення подальшого розвитку підприємства є можливість коригування підходів та логіки бізнес-моделі у захопленні цінності, а застосування науково-творчого підходу у цьому процесі може робити її унікальною, важкою для копіювання конкурентами. Технології швидко старіють, продукти легко копіюються, але цілісна бізнес-модель, яка включає ціннісну пропозицію, канали, ключові ресурси, процеси та джерела доходу, – значно складніше повторити.

Основні концепції, яким слідують компанії для збереження конкурентоспроможності та досягнення сталого розвитку. Ціле покоління менеджерів звикло мислити категорією п'яти сил Майкла Портера (1979 рік) [10], основна ідея якого полягала у необхідності проведення глибинного аналізу галузей – такого, який дозволив би компанії зайняти оптимальну позицію щодо конкурентів і цим знайти конкурентну перевагу.

Так, компанії навчилися аналізувати своє конкурентне середовище, визначати свою позицію, розвивати конкурентні та корпоративні переваги, а також краще розуміти, як підтримувати перевагу перед обличчям конкурентних викликів та загроз. Різні підходи, включаючи теорію промислової організації, ресурсний підхід, динамічні можливості та теорія ігор допомогли науковцям та практикам зрозуміти динаміку конкуренції та розробити рекомендації щодо того, як компанії повинні визначати свої конкурентні та корпоративні стратегії.

Пізніше вчені концентрують свою увагу не тільки на проблемах конкуренції та питаннях стратегічного аналізу, а й на створенні конкурентної моделі бізнесу, зокрема, на процесі створення підприємствами цінності для споживачів та інших ключових заінтересованих осіб. Тобто, рушійним фактором у пошуку способу отримання прибутку стає цінність для клієнта, яка залежить від рівня розвитку клієнта, його особистих цінностей, принципів та потреб, поглядів на життя та соціальної відповідальності.

Так вважає і українська вчена Н. Ревуцька [11]. Аналізуючи різні концепції формування бізнес-моделі підприємства, на початку XXI ст. вона висловила думку, що на бізнес-модель підприємства

впливають також «майбутні пріоритети споживачів». Тому сегментація споживачів, дослідження їх потреб та виявлення нових (майбутніх) пріоритетів має посідати центральне місце при формуванні бізнес-моделі підприємства.

У 2005 р. Чан Кім та Рене Моборн [12] розробили стратегію блакитного океану, вперше вийшовши за межі теорії М. Портера. Їхня основна думка була новою та зводилася до наступного: якщо ви хочете успішно вдосконалитися, вам доведеться вийти з ринку «червоного» океану з безліччю конкурентів і створити блакитний океан, новий ринок без конкурентів.

Ними було доведено, що ні компанія, ні галузь не можуть бути підходящою одиницею, яка дозволяє пояснити створення блакитного океану та перманентну високоефективну діяльність компанії. З цією метою було виведено поняття «*стратегічний крок*» – набір дій та рішень управлінців, пов'язаних з розробкою суттєвої (значної) бізнес-пропозиції, яка формує новий ринок.

Після вивчення Чан Кім та Рене Моборн зроблено більше 150 стратегічних кроків в період з 1880 по 2000 рік більш, ніж в 30 галузях, що дозволяє прийти до наступного висновку: «При оцінці перемінних характеристик галузі, компанії та стратегії ми знайшли, що створення та завоювання блакитних океанів вдавалось як дрібним так і великим компаніям, як молодим так і досвідченим менеджерам, компаніям як із привабливих так і непривабливих галузей, компаніям новачкам і справжнім мастодонтам, приватним та державним компаніям, в B2B та B2C сферах, а також компаніям самого різного національного походження. В ході аналізу ми не знайшли жодної постійно бездоганної компанії чи галузі. Однак, чи був то Ford в 1908 році зі своєю «Моделлю Т», який посадив Америку на колеса за рахунок доступності, чи CNN, яка запропонувала в 1980 році новини, що йдуть в реальному часі 24 години на добу та 7 днів на тиждень, чи Cirque du Soleil із поєднанням цирку з театром, чи Saleforce.com, яка почала давати користувачам доступ до своїх обчислювальних ресурсів через веб-сайт – незалежно від галузі підхід до стратегії створення блакитних океанів у всіх компаніях був схожий. За 10 років з моменту першого викладення теорії, в результаті збільшення бази досліджень та проведення нових досліджень переконались, що патерни залишились без змін».

Мова йде про те, що для створення блакитного океану управлінці не рівнялись на своїх конкурентів, а підкорювали свої дії іншій стратегічній логіці, розширюючи кордони галузі, тобто робили відповідні стратегічні кроки.

Це один з основних підходів (відображений в таблиці 3), який популяризував системне мислення про радикальні зміни.

Таблиця 3 – Матриця ERRC Grid
Table 3 – ERRC Grid matrix

Компонент	Питання, яке ставить компанія	Мета
Eliminate/усунути	Що з того, що є в галузі, можна повністю усунути, бо не створює цінності?	Зменшення витрат і руйнування шаблонів
Reduce/зменшити	Що варто зменшити до рівня нижчого за галузевий стандарт?	Спрощення, оптимізація
Raise/збільшити	Які чинники треба підняти вище за стандарт?	Покращення для клієнта
Create/створити	Що нове слід створити, щоб запропонувати нову цінність?	Інновації, прорив

В цілому, він характеризується наступним:

- *змінена бізнес логіка*: замість конкуренції – створення нового попиту, замість боротьби за частку ринку – створення нового ринку;
- *визначена проривна конкурентна перевага* шляхом одночасного підвищення цінності для споживача із зниженням витрат;

- *створено новий аналітичний інструмент* для знаходження нової цінності: матриця ERRC Grid («усунути» – «зменшити» – «збільшити» – «створити»).

Також, ні теорія п'яти сил Портера [10], ні стратегія блакитного океану Чан Кім та Рене Моборн [12] не говорять на пряму про сталий розвиток, баланс економічної, соціальної та екологічної складової бізнес-моделі компанії. Але, їх моделі аналізу та логіка мислення дають можливість ставити правильні питання, знаходити відповіді та нові рішення у пошуку сталого розвитку.

Конкурування бізнес-моделями стає новим еволюційним етапом розвитку бізнесу, власників та управлінців.

Що таке інновація та інноваційна бізнес-модель. Їх значення для бізнесу, галузі та економіки. Про саме поняття «інновації» написано безліч наукових статей. Але у векторі дослідження цієї статті обрано два ключових підходи таких науковців як Йозева Шумпетра [13] та Чан Кім з Рене Моборн [12]. Їх погляди в чомусь можна вважати протилежними, але з нашої точки зору, вони більше взаємодоповнюючі.

Йозеф Шумпетер [13] у своїй праці «Теорія економічного розвитку» в 1912 році визначив інновацію як впровадження нових комбінацій у виробництві, що включають виробництво нових або вдосконалених товарів, технологій, методів організації виробництва, а також відкриття нових ринків збуту. **Інновація** (дослівно, походить від латинського "innovare", що означає оновлювати, зміни) – це не просто впровадження нових продуктів чи технологій, а цілеспрямований процес, що руйнує старі моделі та створює нові, забезпечуючи економічний розвиток.

Саме Йозеф Шумпетер вперше ввів до економічного наукового середовища цей термін і вважав інновації ключовим фактором економічного розвитку та конкурентоспроможності. В той час поняття бізнес-моделі не було ще сформоване, але він виділив п'ять типів інновацій, кожний з яких, вважаємо, стосується елементів бізнес-моделі:

- *створення нових товарів* – впливає на елемент, що компанія пропонує клієнтам;
- *використання нових технологій* – впливає на елемент ланцюжка створення вартості – як компанія створює свої продукти/ключові процеси/ключові ресурси;
- *відкриття нових джерел сировини* – впливає на елемент ланцюжка створення вартості – як компанія створює свої продукти/ключові процеси/ключові ресурси;
- *нова організація виробництва* – впливає на елемент ланцюжка створення вартості – як компанія створює свої продукти/ключові процеси/ключові ресурси;
- *освоєння нових ринків* – впливає на елемент ланцюжка створення вартості – як компанія створює свої продукти/ключові процеси/ключові ресурси.

Також, Йозеф Шумпетер [13] підкреслював важливу роль підприємця у процесі інновацій, оскільки саме він втілює нові ідеї та рішення в життя, забезпечуючи їх комерційний успіх.

Майже через 100 років після введення в економічне наукове середовище терміну інновації, автори стратегії блакитного океану заговорили про нове поняття «**інновація цінності**» – нова споживча цінність, яка створюється в тій області, де дії компанії позитивно впливають на структуру її витрат та на пропозицію цінності покупцям (рисунок 2).

Інновація цінності передбачає, що однакова увага приділяється як цінності, так і інновації. Цінність без інновації, як правило, зводиться до наростаючої цінності, тобто цінність збільшується, але це не дозволяє компанії виділитися серед конкурентів. Інновації без цінності для покупців призводять до захоплення технологіями, ринковому першопрохідництву або футуристичній спрямованості. Все це часто знаходиться за межами того, що покупці готові застосовувати та за що готові платити. Тому важливо відрізняти інновацію цінності від технологічної інновації та ринкового першопрохідництва.

Дослідження Чан Кім з Рене Моборн [12] показали, що переможців, які створили блакитні океани, від невдахи відрізняє не наявність найсучасніших технологій та не строки виходу на ринок. Інколи ці компоненти присутні, але частіше компанії обходяться без них.

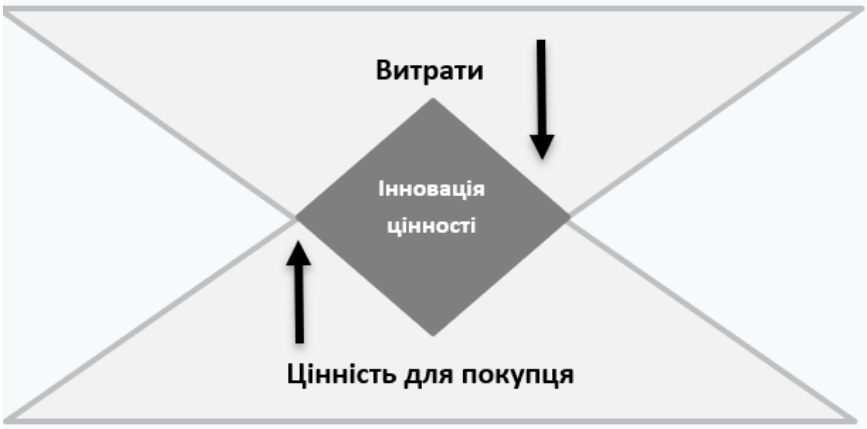


Рисунок 2 – Де знаходиться інновація цінності?
Figure 2 – Where is the value innovation?
Ілюстрація з книги «Теорія блакитного океану» [12]

Інновація цінності досягається лише тоді, коли компанія поєднує інновацію з такими аспектами як практичність, ціна та витрати. Важливо, що скорочення витрат досягається шляхом скасування або зниження факторів, по яких відбувається конкуренція в певній галузі за рахунок зміни кордонів ринку. Цінність для покупця зростає завдяки створенню та розвитку елементів, які ця галузь раніше ніколи не пропонувала. З часом витрати стають ще меншими за рахунок ефекту масштабу виробництва в результаті великих обсягів продажу, що генеруються за рахунок ідеальної цінності.

Якщо пов'язати інновацію з цінністю таким чином не виходить, то інноватори технологій та першопрохідники ринку починають нести яйця, котрі потім висиджують вже інші компанії.

Чан Кім та Рене Моборн [12] зазначають, що для перетворення інновації цінності в актуальну стратегію потрібна не лише єдність корисності, ціни, витрат, а й людського фактору. Саме системний підхід перетворює інновацію цінності в стратегію, а не в звичайне робоче чи функціональне рішення.

Інновація цінності вимагає, щоб компанії орієнтували свою систему на досягання саме стрибка цінності для покупців та для самих себе.

Також в стратегії блакитного океану Чан Кім та Рене Моборн [12] (як і в «Теорія економічного розвитку» Йозефа Шумпетера [13]) не згадується й про саме поняття бізнес-модель. Але наступні терміни та словосполучення вказують на необхідність коригування її елементів:

- «*пропозиція цінності», «інновація цінності*» – елемент бізнес-моделі, який відноситься до того, що компанія пропонує клієнтам;
- *«структура витрат»* – елемент бізнес-моделі, який відноситься до механізму отримання прибутку/прибуткова формула/витратна структура;
- «*…потрібна єдність корисності, ціни, витрат та людського фактору*» – утворюється система, з елементами бізнес-моделі;
- *«… щоб компанії орієнтували свою систему на досягнення …»* – ця система по сутті є бізнес-моделлю.

Бачимо, автори цих двох підходів вважають, що для збереження розвитку компанії, необхідно привносити інновації у елементи бізнес-моделі та наголошують на важливості в цьому питанні людського фактору, зокрема управлінців, та системному підході.

Під час пошуку інновації цінності за стратегією блакитного океану, може застосовуватися, але не обов'язково, один чи декілька типів інновацій за теорією Йозефа Шумпетера [13]. Тобто, вони доповнюють одна одну. А одночасна зміна як мінімум цінності товару чи послуги та структури витрат (тобто двох елементів бізнес-моделі) призводять до системних змін логіки ведення бізнесу, яка не завжди обов'язкова для відкриття блакитного океану та забезпечення стрибка цінності.

Іноді достатньо застосувати елементи бізнес логіки суміжних галузей для створення нового простору цінності у своїй галузі, як це зробив Cirque du Soleil, чи достатньо змінити фокус цінності або переорієнтуватися на інший сегмент клієнтів не змінюючи фундаментальної логіки бізнесу, прикладом чого є компанія Swatch. Вона не змінювала принципово продукт, канали збуту, джерела доходу чи принципи виробництва, тобто елементи бізнес-моделі. Замість цього вона почала позиціонувати годинник як модний аксесуар, а не розкіш чи точний механізм. Структура витрат також була переглянута: пластик замість металу, проста збірка. Маркетологи змінили емоційне сприйняття годинника: клієнти купують не годинник, а настрій. За рахунок цього проявлено новий ринок (клієнти яким потрібно саме «настрій», «модний аксесуар») без прямої конкуренції з Rolex або Casio. Створено новий простір цінності, але не було фундаментальної зміни логіки системи бізнесу.

І все ж таки, у процесі пошуку інновації цінності та знаходженні балансу між викликами та можливостями найчастіше виникає потреба у змінах, які стосуються фундаментальних елементів бізнесу (розглянутих вище), впливають на всю бізнес-модель та призводять до її перетворення. А у випадку виникнення в цьому процесі бізнес-моделі, яка на даний час ще відсутня в галузі, з'являється інноваційна бізнес-модель. Тобто, **інноваційна бізнес-модель** – це новий, перетворений спосіб ведення бізнесу, який виникає в результаті створення нової цінності для компанії та її клієнтів одночасно, а також принципово відрізняється від існуючих в галузі бізнес-моделей. Вона може включати в себе зміни в технологіях, процесах, структурі компанії, або в способі взаємодії з клієнтами, які можуть бути інноваційними на ринку або ні. А певна комбінація управлінських рішень у поєднанні з технологічними можливостями робить бізнес-модель тим фактором, який здатен конкурувати та стабільно розвивати компанію. Крім того, тільки аналізуючи «прототип» рішень у складі загальної системи ведення бізнесу, а не відірвано від неї, можливо оцінити їх доцільність, а також мінімізувати ризики.

Це й пояснює, чому варто приділяти належну увагу трансформації бізнес-моделі з урахуванням вже існуючих викликів та тих, які з високою долею ймовірності можуть настати, а не просто інноваціям технологій без картинки в цілому.

Чи будь-яка інноваційна бізнес-модель автоматично вирішує питання балансу між екологічними, економічними та соціальними складовими? Ні. Так як і не кожна інноваційна бізнес-модель автоматично є гарантом успіху в галузі, виходу в блакитний океан чи забезпечує розвиток компанії. Так як і не будь-яке управлінське рішення є гарантією успіху компанії. Але при знаходженні «магічної» комбінації серед можливих варіацій використання інструментів та підходів кожного елемента бізнес-моделі й створюється унікальна бізнес-модель, що забезпечує сталий розвиток компанії.

Які бізнес-моделі визначенні інноваційними, успішними та чому. В підтвердження висловлених думок розглянемо декілька успішних інноваційних бізнес-моделей, які всесвітньо визнані такими:

- **Rolls-Royce**: Виробник авіадвигунів впровадила інноваційну бізнес-модель «Оплата за льотну годину», в результаті чого став піонером підписної моделі у важкій промисловості, а інші компанії розвинули його інноваційну бізнес-модель у своїх сегментах. До цього традиційна бізнес-модель в галузі передбачала одноразові платежі відповідно до схеми ціноутворення на основі витрат.
- **Netflix:** Здійснив революцію в індустрії домашніх розваг, запровадивши модель потокового передавання фільмів і телешоу на основі підписки. Це приклад, коли відбулось поєднання інновації технології, в її результаті отримано інновацію цінності та інноваційну бізнес-модель в галузі.
- **Airbnb**: На відміну від двох попередніх прикладів, у цієї компанії не було традиційної бізнес-моделі взагалі. Вона з'явилася на ринку відразу з іншою логікою, ніж була на той час на готельному ринку. Своєю інноваційною моделлю Airbnb змінив індустрію гостинності, запропонувавши платформу, яка дозволяє окремим особам здавати в оренду своє житло або вільні кімнати мандрівникам. Вони створили ринок, який об'єднує господарів та гостей, дозволяючи людям знаходити

унікальне та доступне житло по всьому світу. Їх інноваційна бізнес-модель також в подальшому набула розвитку і в інших галузях.

Більш детально дані бізнес-моделі розглянуті в таблиці 4, де наведено порівняння їх трансформованих елементів.

Таблиця 4 – Трансформовані елементи бізнес-моделей Rolls-Royce, Netflix та Airbnb
Table 4 – Transformed elements of Rolls-Royce, Netflix and Airbnb business models

Елемент бізнес-моделі	Компоненти та інструменти елементів бізнес моделі, їх реалізації		
	Rolls-Royce	Netflix	Airbnb
Ціннісна пропозиція	До: Продаж двигуна як товару. Клієнт отримував продукт і сам відповідав за експлуатацію та ремонт. Після: 1962 рік. Продаж «льотних годин» (послуги), а не самого двигуна. Створено інновацію цінності в галузі без інновацій в самих двигунах. Клієнт отримує доступність, зменшує свої витрати та ризики. Відкрито новий простір без руйнування інших.	До: Оренда DVD поштою. Після: 2007 рік. Онлайн-стрімінг «будь-де й будь-коли» без необхідності фізичних носіїв. Створено інновацію цінності в галузі разом з технічною інновацією. Миттєвий доступ до контенту, величезна бібліотека, персоналізація. Відбулось витіснення прокату DVD та Blockbuster, тобто відбулось їх руйнування.	До: Подорожі = готелі Після: 2008 рік. Створена нова платформа, яка дозволяє окремим особам здавати в оренду своє житло або вільні кімнати мандрівникам Створено інноваційну цінність в галузі як для власників житла, яке здається в оренду так і для тих, кому потрібно житло в оренду. Стало дешевше, автентичніше та більше варіантів. Відкрито новий простір без руйнування інших.
Клієнтські сегменти	До: Авіакомпанії купували двигуни одноразово – великі капітальні витрати. Після: Авіакомпанії з меншими бюджетами також отримали доступ до сучасних двигунів, бо не потрібно купувати їх у власність. Розширений клієнтський сегмент. Створено умови для користування виключно коли потрібен двигун.	До: Споживачі США, що брали DVD напрокат. Після: Глобальна аудиторія, мільйони підписників у різних країнах. Стерті територіальні кордони для розширення ринку.	До: Мандрівники, що користувалися лише готелями. Після: Глобальні туристи, бюджетні та преміум-подорожі. Також — господарі квартир як новий сегмент. Створено умови для спільного користування.

Продовження таблиці 4

Елемент бізнес-моделі	Компоненти та інструменти елементів бізнес моделі, їх реалізації		
	Rolls-Royce	Netflix	Airbnb
Ланцюжок створення вартості (як): Відносини з клієнтами	До: Одноразова угода купівлі-продажу. Після: Довгострокові партнерські відносини, побудовані на сервісному контракті та взаємній вигоді. Стали більш довготривалі, з постійною взаємодією, більш лояльні.	До: Разові угоди оренди. Після: Довгострокові підписки Стали більш персоналізованими, сервісними, компанія постійно підтримує, оновлює пропозицію під клієнта.	До: Формальні стосунки готель–клієнт Після: Peer-to-Peer взаємодія (господар ↔ гість), але з довірою через рейтинги та відгуки. Стали прямими, рівноправними, де цінність не через компанію як виробника, а через спільноту користувачів, де кожен може бути і клієнтом, і постачальником.
Ланцюжок створення вартості (як): Канали збуту	До: Прямий продаж двигунів через традиційні контракти купівлі-продажу товару. Після: Доставка цінності відбувається через: контракти на льотні години, цифровий моніторинг стану двигунів (IoT, телеметрія), глобальну сервісну мережу техобслуговування, довгострокову підтримку та гарантії. Клієнти менш схильні змінювати постачальника, адже інтегровані у його сервіс. Також, це в подальшому дає більше розуміння для створення нової інновації цінності.	До: Поштова доставка DVD Після: Цифрова платформа (додаток, сайт, SmartTV). Клієнти отримали максимальну зручність: контент миттєво, доступ «будь-де й будь-коли» через інтернет.	До: Туристичні агенції, корпоративні договори, сайти. Після: Онлайн-платформа (сайт і додаток), що напряму з'єднує господарів і гостей – основний канал.

Продовження таблиці 4

Елемент бізнес-моделі	Компоненти та інструменти елементів бізнес моделі, їх реалізації		
	Rolls-Royce	Netflix	Airbnb
Ланцюжок створення вартості (як): Ключова діяльність	До: Основний фокус — виробництво і продаж двигунів Після: Фокус на технічне обслуговування, аналітику стану двигунів, прогнозування поломок, оптимізацію витрат клієнта.	До: Логістика дисків. Після: Хмарна інфраструктура, власне виробництво контенту (Netflix Originals), рекомендаційні алгоритми.	До: Будівництво та утримання готелів. Після: Платформа, що об'єднує попит і пропозицію, без інвестицій у нерухомість.
Ланцюжок створення вартості (як): Ключові ресурси	До: Заводи, технології виробництва. Після: Двигуни залишаються власністю Rolls-Royce, плюс ключовим ресурсом стають дані про їх експлуатацію і власна сервісна мережа.	До: DVD-диски, складські приміщення. Після: Платформа, база даних користувачів, права на контент, власні студії.	До: Готельні будівлі, персонал. Після: Платформа, алгоритми, база користувачів, система довіри (відгуки, рейтинги).
Ланцюжок створення вартості (як): Ключові партнери	До: Постачальники комплектуючих та сировини, авіабудівні компанії, фінансові та лізингові компанії. Після: З'явились нові партнери — сервісні центри, IT-системи моніторингу, логістичні компанії для швидкої доставки деталей.	До: Пошта USPS, дистриб'ютори DVD. Після: Студії, актори, режисери, провайдери хмарних сервісів (AWS)	До: Туроператори та турагентства, постачальники продуктів та послуг, місцева інфраструктура, Корпоративні клієнти та бізнес-партнери Після: Господарі житла, провайдери платежів, локальні сервіси (прибирання, підтримка).
Механізм отримання прибутку: Механізм доходу	До: Разовий великий платіж при купівлі двигуна. Після: Регулярні платежі за льотні години – підписна модель (subscription) у важкій промисловості. Змінено/створено новий спосіб монетизації. Створено стабільний повторюваний дохід. Замість одноразових продажів формується довгостроковий грошовий потік.	До: Орендна плата за DVD. Після: Щомісячна підписка на онлайн-доступ. Змінено спосіб монетизації. Створено стабільний повторюваний дохід.	До: Плата за номер, F&B та додаткові послуги Після: Комісія з кожної броні (з господаря та/або гостя).

Кінець таблиці 4

Елемент бізнес-моделі	Компоненти та інструменти елементів бізнес моделі, їх реалізації		
	Rolls-Royce	Netflix	Airbnb
Механізм отримання прибутку: Структура витрат	До: Основні витрати зосереджені на виробництві та гарантійному ремонті. Після: Постійні витрати на сервіс і підтримку, але зменшення витрат завдяки предикативній аналітиці й оптимізації, покращенню техобслуговування.	До: Закупівля дисків, логістика. Після: Контент-продакшн, сервери, маркетинг.	До: Персонал, утримання будівлі (амортизація, ремонт), забезпечення ресторану Після: Технічна підтримка платформи, маркетинг, правове регулювання.
Отримана назва бізнес-моделі	«Power by the Hour» «Equipment-as-a-Service» (EaaS) «Usage-based business model» Приклад сервітизації (servitization) – трансформації продуктового бізнесу у сервісний.	«Subscription-based streaming model» «Flat-rate subscription model»	«Peer-to-Peer (P2P) Sharing Economy Model» «Two-sided platform business model»
Хто в подальшому застосував цю інноваційну бізнес-модель	Kaeser Kompressoren у 1990–2000-х роках запустили модель *«Повітря як Сервіс»* /«Compressed Air-as-a-Service». Caterpillar у 2000-х роках з ідеєю *«Оплати за мотогодини»*. Siemens з розвитком індустрії 4.0 (з 2010 року) із цифровими платформами «Виробництво як Сервіс»/«*Manufacturing-as-a-Service».*	Coursera Plus, Udemy Business, Masterclass - підписка на навчальні курси. Scribd, Audible (Amazon) – книги та аудіокниги у форматі «All-you-can-Read/Listen». Spotify (2008) – музика за підпискою (A*ll-you-can-Listen*). Disney+, HBO Max, Amazon Prime Video, Apple TV+ – прямі конкуренти Netflix у відеострімінгу.	Booking.com (після 2010) – перейняв модель приватних апартаментів, які спочатку не були його фокусом. WeWork – «Офіси як сервіс» (короткострокова оренда робочих просторів). Uber – спільне використання авто, але за принципом тієї ж платформи. Turo – «Airbnb для авто», здача власних машин в оренду. BlaBlaCar – спільні поїздки.

Як бачимо, ці інновації бізнес-моделей змінюють логіку створення та отримання вартості, кидають виклик існуючим припущенням, нормам та галузевим практикам, щоб дослідити нові шляхи зростання цінності та прибутковості. А після того як вони підтвердили свою успішність та ефективність стали застосовуватися компаніями в інших галузях.

Наведені приклади повною мірою відповідають наступним визначенням «інновація бізнес-моделі»:

- Генгі Чесбро [4]: це відкриття нових механізмів монетизації та надання цінності, які розширюють межі компанії та дозволяють краще використовувати знання, ресурси або технології;
- Девід Тіс [5]: це розробка нових способів комерціалізації інновацій, які забезпечують конкурентну перевагу, яка не обов'язково ґрунтується на технологічних інноваціях;
- Гассман О., Франкенбергер К., Цик М. [9]: це фундаментальна зміна логіки того**,** як компанія створює та захоплює цінність, шляхом модернізації кількох елементів бізнес-моделі.

Кожна з цих інноваційних бізнес-моделей виникла в результаті створення інновації цінності. Далі ці компанії принципово змінили компоненти та інструменти практично кожного елементу бізнес-моделей, в результаті чого вони стали інноваційними.

Також, на цих прикладах можна побачити наступні їх особливості-характеристики:

- високо клієнтоорієнтовні;
- орієнтовані на довгострокове партнерство;
- перехід до сервітізації;
- орієнтовані на довіру через відкритість певних даних та роботу з Big Data;
- все частіше спосіб монетизація – підписки;
- все частіше застосовується sharing economy;
- перехід до цифрових без паперових ланцюгів.

Яким чином інноваційні бізнес-моделі стають елементами сталого розвитку. Принципом сталого розвитку є досягнення балансу інтересів між економічними, екологічними та соціальними питаннями (рис. 3). Порушення рівноваги між ними впливає на погіршення якості життя.

Компанії, яким вдається збалансувати ці сфери суттєво знижують свої ризики. По перше, компанія менше потрапляє під санкції зі сторони екологічного законодавства. По друге, компанія вибудовує довіру до неї клієнтів, суспільства, працівників, інвесторів та інших партнерів. По третє, компанія формує собі основу для майбутнього зростання на десятиліття.

Все взаємопов'язано. В таблиці 5 проведено співставлення елементів бізнес-моделей та умов сталого розвитку, тобто на який елемент бізнес-моделі впливає певна умова сталого розвитку.



Рисунок 3 – Де знаходиться баланс інтересів?
Figure 3 – Where is the balance of interests
Ілюстрація з сайту https://www.ecolabel.org.ua/stalij-rozvitok

Таблиця 5 – Співвідношення елементів бізнес-моделі та умов сталого розвитку
Table 5 – Correlation of business model elements and sustainable development conditions

Елемент бізнес-моделі за Гассман О., Франкенбергер К., Цик М.	Модифікуються через управлінські рішення, які забезпечують:	Умови сталого розвитку
Економічна сталість = довгострокові сталі доходи, прибуток		
Ланцюжок створення вартості (як) та/або Ціннісна пропозиція (що) та/або Механізм отримання прибутку (чому)	Інновація цінності та/або Технічна інновація (ШІ, цифровізація та аналітика даних, WMS, Digital Twin і т. д.) та/або Інновація процесу (реінжиніринг бізнес-процесів)	Ефективне використання ресурсів Стабільне економічне зростання Фінансова життєздатність бізнесу (прибутковість та стабільність доходів) Створення довгострокової цінності для інвесторів і клієнтів
Екологічна сталість = мінімізує негативний вплив		
Ланцюжок створення вартості (як) та/або Ціннісна пропозиція (що) та/або Механізм отримання прибутку (чому)	Інновація цінності та/або Технічна інновація (відновлювані джерела енергії. повторне використання і переробка відходів, ШІ, Digital Twin і т. д.) та/або Інновація процесу (реінжиніринг бізнес-процесів)	Збереження природного капіталу: вода, земля, атмосфера, біорізноманіття Мінімізація забруднення довкілля та відходів Підтримка екосистем і кліматичний баланс Збереження біорізноманіття та природних екосистем

Продовження таблиці 5

Елемент бізнес-моделі за Гассман О., Франкенбергер К., Цик М.	Модифікуються через управлінські рішення, які забезпечують:	Умови сталого розвитку
Соціальна сталість = створює цінність для суспільства		
Ціннісна пропозиція (що) та/або Ланцюжок створення вартості (як) та/або Механізм отримання прибутку (чому)	Інновація цінності та/або Технічна інновація та/або Інновація процесу (реінжиніринг бізнес-процесів)	Забезпечення гідної праці та соціального захисту Підвищення якості життя та добробуту суспільства Доступ до освіти, охорони здоров'я та базових послуг Сприяння соціальній згуртованості та інклюзивності Внесок у розвиток місцевих громад

Як бачимо, сталий розвиток проходить через усі елементи бізнес-моделі. Але найсильніше він проявляється у ціннісній пропозиції, ключових ресурсах, партнерах та структурі витрат. Саме там відображається баланс економічного прибутку, соціального впливу та екологічної відповідальності.

Аналізуючи розглянуті приклади інноваційних бізнес-моделей через призму принципів сталого розвиту (розглядаються тільки екологічний та соціальний, оскільки економічний досліджено вище при аналізуванні їх бізнес-моделі на інновації) можна відмітити, що Rolls-Royce вже інтегрував у свою інноваційну бізнес-модель методику циркулярної економіки. Щорічно згідно програми Revert [14] переробляється близько 20 000 тонн високоякісних металів, що економить близько 80 000 тонн CO_2, порівняно з використанням нової сировини. Також, до 2030 року він планує знизити прямі та енергетичні викиди до нуля у виробництві. У рамках стратегії декарбонізації та забезпечення низьковуглецевої енергії готуються до експлуатації три малогабаритні реактори. Значна увага приділяється тестуванню на 100% Sustainable Aviation Fuel (SAF – стале авіаційне паливо). При спалюванні SAF виділяється значно менше CO_2, до 80% менше викидів парникових газів протягом життєвого циклу. Також, Rolls-Royce не нехтує соціальними питаннями, створює нові якісні робочі місця. Він постійно інвестує у гідну працю, охорону здоров'я та безпеку.

Тобто, Rolls-Royce, створивши інноваційну бізнес-модель через інновацію цінності для авіакомпаній (клієнта) та себе (вийшов у блакитний океан) шляхом переходу до сервітизації, далі працював над технічною та технологічною інноваціями, які прямо позитивно впливають на екологію та опосередковано на соціум. Ця компанія активно застосовує та продовжує розвивати відновлювані джерела енергії, повторне використання і переробку відходів. І ця стратегія через певний час з високою долею ймовірності дозволить їй вийти у новий блакитний океан (з інноваційною бізнес-моделлю чи просто з оновленою).

За рахунок технічної інновації бізнес-модель Netflix дозволила зменшити споживання пластику та паперової упаковки, скоротити витрати вуглецевих викидів за рахунок зменшення навантаження на транспортування. Однак, вплинула на масивне споживання енергії для дата-центрів і потокового відео, а також наявна сильна залежність від енергомістких серверних ферм. Розглядаючи цю бізнес-модель на питання соціального параметру, також можна сказати, що не зважаючи на створення нових робочих місць, підтримку культурного різноманіття, доступність освітнього й документального контенту все ж таки залишаються сильні негативні фактори. Все більше в наукових дослідженнях зазначається про соціальну ізоляцію та не завжди прозоре ставлення до авторських прав локальних авторів. Тобто, ця інноваційна бізнес-модель не в повній мірі відповідає критеріям сталого розвитку.

Бізнес-модель Airbnb також лише частково відповідає стратегії сталого розвитку завдяки використанню принципів «sharing economy», що призводить до зменшення потреби у новому будівництві. Таким чином забезпечується оптимальне використання ресурсів. Але водночас все більше в статтях та наукових дослідженнях фіксуються суттєві соціальні та екологічні ризики, які породжує бізнес-модель Airbnb, серед яких: спричинення перевантаження інфраструктури міст та втрата доступності житла, породження соціальної нерівності.

Не можливо однозначно узагальнено сказати, що саме та на що впливає. Однак очевидно, що саме позитивне управлінське рішення стосовно інновацій запускає механізм трансформації бізнес-моделі. Далі, в залежності від того, які будуть знайденні нові комбінації складових та інструментів елементів бізнес-моделі, а також який рівень врахування умов сталого розвитку вони дозволять реалізувати (впровадити) й визначить, яка саме бізнес-модель з’явиться після її трансформації: модифікована, інноваційна або інноваційна зі сталим розвитком, яка є найвищим рівнем еволюції бізнес-моделі.

Приклади цих компаній підтверджують раніше висловлену думку, що не всі інноваційні бізнес-моделі відповідають сталому розвитку. Також, імпульсом їх інновації цінності, яка сприяла виникненню інноваційних бізнес-моделей не була вимога балансу між економічними, екологічними та соціальними питаннями. Можливо, це пояснюється часом виникнення поняття «сталий розвиток» та часом, коли ці бізнес-моделі були трансформовані у інноваційні.

Вперше на глобальному рівні було визнано взаємозв’язок між економічним зростанням і охороною довкілля у 1972 році на Стокгольмській конференції ООН з довкілля, тобто після виникнення інноваційної бізнес-моделі Rolls-Royce, але значно раніше інноваційних моделей Netflix та Airbnb. Хоча в подальшому, як показав аналіз, саме Rolls-Royce почав активно працювати над екологічними питаннями. Це можна пояснити як галуззю, в який він веде бізнес (високий негативний вплив на екологію), так і рівнем розвитку його управлінського складу та бізнесу в цілому. А негативні наслідки інноваційної бізнес-моделі Airbnb не відразу були очевидними і лише з певним часом почали проявлятися.

Однак, є й інноваційна бізнес-модель, імпульсом якої виступило поєднання переходу до сервітизації із введенням у виробництво повторного використання матеріалів, що створило інноваційну бізнес-модель галузі зі сталим розвитком. Прикладом такої бізнес-моделі є американська компанія виробників килимових покриттів Interface Inc.

Згідно її інноваційної бізнес-моделі, яка виникла в 2012 році, клієнти купують не покриття, а платять за користування покриттям, в результаті чого вона отримала назву «Flooring-as-a-Service». Клієнти отримують завжди якісне покриття без необхідності утримання та утилізації, покриття при цьому стає ще й більш доступніше, а компанія створює не разові продажі, а регулярні платежі. Також, в процесі оновленого ланцюга створення цінності досягається позитивний екологічний та суспільний вплив. За рахунок ресайклінгу відбувається менше відходів, зниження вуглецевого сліду та створено нові якісні робочі місця. Результати цієї бізнес-моделі говорять самі за себе [15].

Економічні результати:

- зберегла позиції світового лідера в сегменті килимової плитки (≈ 35 % ринку США, значна частка в Європі);

- за 2000-2020 рр. зросла на понад 80 % у глобальному вимірі (незважаючи на високу конкуренцію з дешевшими азійськими виробниками).

Екологічні результати:

- зменшила викиди CO_2 на 96 % (дані Interface за програмою *Climate Take Back*);
- використовує 100 % відновлюваної енергії на виробництві;
- в 2020 році досягла ціль «Mission Zero» – повна відмова від викопних ресурсів у виробництві.

Соціальні результати:

- створила мережу партнерств із місцевими громадами для збору та переробки відходів, одна з них – програма Net-Works із переробки рибальських сітей у Філіппінах та Камеруні. Це дало нові робочі місця і зменшило проблему пластикового сміття в океанах.

Interface Inc. довела, що інноваційна бізнес-модель, побудована на сервісі у поєднанні із умовами сталості, може бути не лише етичною, а й надзвичайно прибутковою. Вона створила блакитний океан у традиційному консервативному ринку будматеріалів, де раніше змагались лише ціною та якістю продукту.

Протягом останнього десятиліття все більше людей розуміють свій внесок у вирішення екологічно-соціальних проблем та готові робити відповідні зусилля. За даними глобального дослідження Dentsu Sustainable Lifestyle [16, 17], у 2021 році 74 % респондентів вважають, що суспільство може бути змінене завдяки кумулятивному ефекту індивідуальних зусиль, а 48 % – вже переходять на бренди, які знижують свій негативний ефект на клімат або вирішують соціальні проблеми. Аналогічні дані наводить дослідження Tetra Pak Index [18], згідно з яким близько 50 % респондентів вірять, що кожне рішення, яке вони приймають щодня, впливає на навколишнє середовище.

Згідно з дослідженнями Toluna, Harris Interactive та Kurundata [19], 85 % респондентів вважають, що бренди повинні нести відповідальність перед споживачами, а 69 % – вважають турботу про довкілля найважливішою цінністю бренду. 47 % людей в усьому світі перестали підтримувати бренди, які не відповідають їхнім цінностям [20]. За даними Tetra Pak, пандемія лише посилила загальний тренд до усвідомленого споживання – 35 % людей стали частіше, ніж до пандемії, вибирати бренди, ґрунтуючись на їхній репутації щодо сталого розвитку.

Таким чином, це ще одне підтвердження, що споживачі все активніше впливають на поведінку компаній, на зміну їхніх бізнес-моделей. І може бути таке, що технічна та технологічна інновація або інновація процесу, яка дозволяє вирішити екологічну вимогу сталого розвитку створить автоматично інновацію цінності. Але чи буде при цьому бізнес-модель інноваційною (тобто відбудуться фундаментальні системні зміни у компонентах чи інструментах її елементів) та збалансованою по інших показниках однозначно сказати неможливо, поки не буде проведено аналіз усієї бізнес-моделі у порівнянні з наявними в галузі та за параметром «довгострокового економічного розвитку».

Висновки. В основі будь-якої бізнес-моделі лежать певні сталі елементи, до складу яких входять «рухливі» компоненти та «змінні» інструменти. Саме під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів (викликів, різних інновацій та потреб) управлінці компаній комбінують їх та створюють бізнес-модель компанії. В залежності від того що змінилося в оновленій бізнес-моделі залежить якою вона стає: модифікованою, інноваційною чи інноваційною зі сталим розвитком.

Оскільки бізнес-модель – це певна система, то в ній все взаємопов’язано. З однієї сторони, в залежності від того, яку нову цінність клієнтам хоче створити компанія залежить, що саме буде необхідно змінити в інших компонентах елементів бізнес-моделі. З іншої сторони, досить часто, саме технічна чи процесна інновація дозволяє створити нову інновацію цінності клієнту.

У випадку покращення або оновлення окремих елементів бізнес-моделі, навіть із залученням технічних, технологічних чи процесних інновацій, в результаті чого не виникає суттєвий стрибок цінності клієнту, не створюється інновація цінності одночасно для клієнтів і компанії та не змінюються принципово правила гри у галузі – виникає модифікована бізнес-модель.

Якщо ж управлінцям вдалось знайти ту «магічну» комбінацію складових та інструментів елементів бізнес-моделей, яка створила суттєву інновацію цінності одночасно для клієнтів та компанії, змінила правила гри в галузі – виникає інноваційна бізнес-модель. У такій бізнес-моделі відбувається фундаментальна зміна логіки захоплення цінності, яка призводить, досить часто, до змін практично в кожному її елементі.

Інноваційна бізнес модель не дорівнює інноваційний продукт, технологічна інновація або інноваційний процес, вона не обов'язково пов'язана зі сталим розвитком.

Але, при знаходженні управлінських рішень, якими вдається адаптувати ланцюжок створення вартості або ціннісної пропозиції до вимог сталого розвитку та надавати клієнтам нову суттєву цінність, змінюючи при цьому правила гри, інноваційна бізнес-модель стає елементом сталого розвитку, яка ефективно не тільки конкурує, а й відкриває новий простір можливостей.

Саме тому, на найвищій еволюційній сходинці бізнес-моделей знаходяться інноваційні бізнес-моделі зі сталим розвитком, коли враховані та збалансовані економічні, екологічні, соціальні показники. Такі бізнес-моделі забезпечують сталу конкурентну перевагу на десятиліття.

Звісно, ризики у інноваційної бізнес-моделі вищі, ніж у звичних бізнес-моделей, оскільки вони унікальні і не мають ще перевірених даних на практиці. А успіх чи невдача бізнес-моделі компанії значною мірою залежить від того, як вона взаємодіє з моделями інших гравців галузі.

Також, ці моделі повинні бути здатними підтримувати баланс протягом тривалого періоду часу, який необхідний для розробки знову нової інноваційної бізнес-моделі, що буде адаптована до нових змін та викликів із знаходженням магічної рівноваги між економічними, екологічними та соціальними питаннями. Тільки за такої умови підприємство буде відповідати принципу сталого розвитку в повній мірі.

Без талановитих, проактивних та прогресивних управлінців й керівників ймовірність створення інноваційної бізнес-моделі низька, а ймовірність перетворення її на елемент сталого розвитку знижується до нуля. І не останню роль в цьому відіграє рівень свідомості клієнтів компанії та суспільства в цілому.

Перелік посилань

1. Morris, M., Schindehutte, M., & Allen, J. The entrepreneur's business model: toward a unified perspective. Journal of Business Research. 2005. 58(6). С. 726-735. URL: https://www.academia.edu/1423496/The_entrepreneurs_business_model_toward_a_unified_perspective?utm_source=chatgpt.com

2. Rappa, M. Business models on the web. North Carolina State University. 2000. URL:https://digitalenterprise.org/models/

3. Остервальдер А., Піньє І. Побудова бізнес-моделей: Настільна книга стратега та новатора. Гобокен, Нью-Джерсі: John Wiley & Sons, 2010. 288 с.

4. Чесбро Г. Відкриті бізнес-моделі: як процвітати в новому інноваційному середовищі. – Бостон, Массачусетс: Harvard Business School Press, 2006. 272 с.

5. Teece, D. J. Business Models, Business Strategy and Innovation. Long Range Planning. 2010. Vol.43, No. 2–3. P.172–194. URL: https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.003

6. Casadesus-Masanell, R., & Ricart, J. E. From strategy to business models and onto tactics. Long Range Planning. 2010. 43(2–3). P.195–215. URL: https://doi.org/10.1016/j.lrp.2010.01.004

7. Остервальдер О. Піньє Ів. Створюємо бізнес-модель. Наш Формат, 2017. 288 с.

8. Джонсон М. В. Захоплення білого простору: інновації бізнес-моделі для зростання та оновлення. Бостон: Harvard Business Press, 2010. 240 с.

9. Гассман, О., Франкенбергер, К., Цик, М. Навігатор бізнес-моделей: 55 моделей, що змінять ваш бізнес. Гарлоу: Pearson Education Limited, 2014. 400 с.

10. Портер М. Конкурентра стратегія. Техніки аналізу галузей і конкурентів. Наш Формат, 2020. 424 с.

11. Ревуцька М. Формування бізнес-моделі підприємства (за матеріалами підприємств харчової промисловості України): дис. канд. екон. наук : спец. 08.00.04. Ін-т економіки та прогнозування НАН України. Київ, 2005. 255 с. (облікова картка дисертації 0405U004226 URL: https://uacademic.info/ua/document/0405U004226#google_vignette

12. В. Чан Кім, Рене Моборн. Стратегія блакитного океану. Як знайти та створити ринок, вільний від інших гравів. Harvard Business Review Press, 2015. 336 с.

13. Йозеф А. Шумпетер. Теорія економічного розвитку: Дослідження прибутків, капіталу, кредиту, відсотка та економічного циклу. Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», 2011. 242 с.

14. Rolls-Royce. Annual Report 2024. URL: https://www.rolls-royce.com/investors/results-reports-and-presentations/annual-report-2024.aspx

15. Interface. Interface Announces Mission Zero Success, Commits to Climate Take Back. URL: https://www.prnewswire.com/news-releases/interface-announces-mission-zero-success-commits-to-climate-take-back-300949740.html?utm_source

16. Dentsu Group Inc. Sustainable Lifestyle Receptivity Survey 2021 Run in 12 Countries; Follow-up to 2010 Poll. September 8, 2021. URL: https://www.group.dentsu.com/en/news/release/pdf-cms/2021060-0908en.pdf?utm_source

17. Branding in Asia. Consumers Increase Demand for Greater Sustainability from Brands says Dentsu-Microsoft Research. December 8, 2021. URL: https://www.brandinginasia.com/more-consumers-demand-greater-sustainability-from-brands-says-new-dentsu-microsoft-research/?utm_source

18. Ipsos. The Rewired Consumer - Tetra Pak Index 2021. 20th October 2021. URL: https://www.ipsos.com/en/rewired-consumer-tetra-pak-index-2021?utm_source

19. Ecotextile. Sustainability now key to customers – survey. 22 October 2021. URL: https://www.ecotextile.com/2021102243088/news/fashion-retail/sustainability-now-key-to-customers-survey/?utm_source

20. Internet retailing. Shoppers most concerned about environment and drop brands that aren't: study. 20 October 2021. URL: https://internetretailing.net/shoppers-most-concerned-about-environment-and-drop-brands-that-arent-study-23878/?utm_source

BUSINESS MODEL AS AN ELEMENT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT: RECONSIDERING THE PRINCIPLES OF BUSINESS MODEL ENTERPRICE CONSTRUCTION

Alona Shpyh, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: alena-87@ukr.net, tel.+380988123982, https://orcid.org/0000-0002-6909-7088.

Liana Dobzhanska, Postgraduate student of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: dobzhanska@gmail.com, tel.+380675851145, https://orcid.org/0009-0003-6313-142X.

Summary. The article explores how an innovative business model can serve as an effective instrument for achieving sustainable development. The research focuses on the process of transforming a traditional business model into an innovative one, identifying the stages and key factors that drive this transformation. A comparative analysis of several business models, examined before and after their transformation, has been conducted to determine their compliance with sustainability criteria. The results reveal the correlation between the elements of a business model and the principles of sustainable development, highlighting the managerial decisions that can modify a company's business model into an innovative and sustainability-oriented one.

Keywords: business model, innovations, innovative business model, sustainable development, managerial decision, challenges of modern times, value proposition, competitiveness concepts, value innovation, elements of a business model, future consumer priorities, transformation.

References

1. Morris, M., Schindehutte, M., & Allen, J. The entrepreneur's business model: toward a unified perspective. Journal of Business Research. 2005. 58(6). C.726-735. URL: https://www.academia.edu/1423496/The_entrepreneurs_business_model_toward_a_unified_perspective?utm_source=chatgpt.com

2. Rappa, M. Business models on the web. North Carolina State University. 2000. URL:https://digitalenterprise.org/models/

3. Alexander Osterwalder, Yves Pigneur. Business Model Generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2010. 288p.

4. Chesbrough, H. W. Open Business Models: How to Thrive in the New Innovation Landscape. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press, 2006. 272p.

5. Teece, D. J. Business Models, Business Strategy and Innovation. Long Range Planning. 2010. Vol.43, No. 2–3. P.172–194. URL: https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.003

6. Casadesus-Masanell, R., & Ricart, J. E. From strategy to business models and onto tactics. Long Range Planning. 2010. 43(2–3). P.195–215. URL: https://doi.org/10.1016/j.lrp.2010.01.004

7. Osterwalder A., Yves P. Business Model Generation. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2010. 282 p.

8. Johnson M. W. Seizing the White Space: Business Model Innovation for Growth and Renewal. 2010.Boston, MA: Harvard Business Press. 2010. 240p.

9. Gassmann O., Frankenberger K., Csik M. The Business Model Navigator: 55 Models That Will Revolutionize Your Business. Harlow: Pearson Education Limited, 2014. 400p.

10. Michael E. Porter. Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors. Nash Format, 2020. 424p.

11. Revutska, Mariia. Formation of the Business Model of an Enterprise (Based on the Materials of Food Industry Enterprises of Ukraine): Dissertation for the degree of Candidate of Economic Sciences, specialty 08.00.04. Institute for Economics and Forecasting of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 2005. 255 p.
URL:https://uacademic.info/ua/document/0405U004226#google_vignette

12. W. Chan Kim, Renee Mauborgne. Blue ocean strategy. How to create uncontested market space and make the competition irrelevant. Harvard Business Review Press, 2015. 336p.

13. Joseph A. Schumpeter. The Theory of Economic Development by Joseph Alois Schumpeter. Publishing House "Kyiv-Mohyla Academy", 2011. 242p.

14. Rolls-Royce. Annual Report 2024. URL https://www.rolls-royce.com/investors/results-reports-and-presentations/annual-report-2024.aspx

15. Interface. Interface Announces Mission Zero Success, Commits to Climate Take Back. URL: https://www.prnewswire.com/news-releases/interface-announces-mission-zero-success-commits-to-climate-take-back-300949740.html?utm_source

16. Dentsu Group Inc. Sustainable Lifestyle Receptivity Survey 2021 Run in 12 Countries; Follow-up to 2010 Poll. September 8, 2021. URL: https://www.group.dentsu.com/en/news/release/pdf-cms/2021060-0908en.pdf?utm_source

17. Branding in Asia. Consumers Increase Demand for Greater Sustainability from Brands says Dentsu-Microsoft Research. December 8, 2021. URL: https://www.brandinginasia.com/more-consumers-demand-greater-sustainability-from-brands-says-new-dentsu-microsoft-research/?utm_source

18. Ipsos. The Rewired Consumer - Tetra Pak Index 2021. 20 October 2021. URL: https://www.ipsos.com/en/rewired-consumer-tetra-pak-index-2021?utm_source

19. Ecotextile. Sustainability now key to customers – survey. 22 October 2021. URL: https://www.ecotextile.com/2021102243088/news/fashion-retail/sustainability-now-key-to-customers-survey/?utm_source

20. Internet retailing. Shoppers most concerned about environment and drop brands that aren't: study. 20 October 2021. URL: https://internetretailing.net/shoppers-most-concerned-about-environment-and-drop-brands-that-arent-study-23878/?utm_source