



ISSN 0365-8171 (Print)
ISSN 2707-4080 (Online)
ISSN 2707-4099 (CD)

АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ І ДОРОЖНЄ БУДІВНИЦТВО

AUTOMOBILE ROADS
AND ROAD CONSTRUCTION

Issue 119

2026

Випуск 119



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
NATIONAL TRANSPORT UNIVERSITY**

**АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ
І ДОРОЖНЄ БУДІВНИЦТВО**

Науковий журнал

Заснований у 1964 р.

Випуск 119

**AUTOMOBILE ROADS
AND ROAD CONSTRUCTION**

Scientific journal

Established in 1964

Issue 119

**Київ
Kyiv
2026**

ISSN 0365-8171 (Print) ISSN 2707-4080 (Online) ISSN 2707-4099 (CD)

Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науковий журнал.

Київ, 2026. Вип. 119 460 с. DOI:10.33744/0365-8171-2026-119

Заснований у 1964 році. Виходить 4 рази на рік.

Свідectво суб'єкта видавничої справи ДК № 1218 від 30.01.2003 р.

Веб-сайт журналу: <https://arrcjournal.org>

Головна мета наукового журналу – надання широким верствам наукової громадськості можливості обміну інформацією, висвітлення наукових досліджень результатів та науково-методичних розробок, в тому числі на міжнародному рівні, які відносяться до будівельно-транспортної інфраструктури.

У науковому журналі "Автомобільні дороги і дорожнє будівництво" відображені матеріали та наукові розробки вчених і спеціалістів дорожньо-будівельного комплексу, наукових установ і промисловості з вирішення сучасних задач та проблем з напрямків які відповідають спеціальностям, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти (Постанова Кабінету Міністрів України від 29.04.2015 р. № 266 (в редакції постанови Кабінету Міністрів України від 7 липня 2021 р. № 762)): Будівництво та цивільна інженерія; Геодезія та землеустрій; Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології; Технології захисту навколишнього середовища; Системний аналіз; Галузеве машинобудування; Економіка; Менеджмент; Маркетинг; Підприємництво, торгівля та біржова діяльність.

Друкується науковий журнал "Автомобільні дороги і дорожнє будівництво" за рішенням **Вченої ради Національного транспортного університету (протокол № 3 від 26.03.2026)**.

Друковані примірники розповсюджуються серед: державних і провідних бібліотек України, провідних навчальних, наукових, науково-дослідних та проектних закладів дорожньо-транспортного спрямування; підприємств з будівництва, реконструкції, ремонту та експлуатації автомобільних доріг і аеродромів; установ до яких обов'язково повинні надсилатися видання, в яких опубліковані основні результати дисертаційних робіт.

Наказами Міністерства освіти і науки України від 30 листопада 2021 року № 1290 і від 07 квітня 2022 року № 320 науковий журнал внесений до реєстру наукових видань України (*Категорія Б*).

ISSN 0365-8171 (Print) ISSN 2707-4080 (Online) ISSN 2707-4099 (CD)

Automobile Roads and Road Construction: Scientific journal.

Kyiv, 2026. Issue. 119 460 p. DOI:10.33744/0365-8171-2026-119

Founded in 1964. Published 4 times a year.

Certificate of the subject of publishing ДК № 1218 dated 30.01.2003.

Journal website: <https://arrcjournal.org>

The main purpose of a scientific journal is to provide broad sections of the scientific community with the opportunity to exchange information, cover research results and scientific and methodological findings, including the international level, related to transport infrastructure.

У науковому журналі "Automobile Roads and Road Construction" reflects the materials and scientific findings of road construction complex, scientific institutions and industry scientists and specialists to solve modern problems and problems in the areas of which correspond to specialties which provide training for higher education graduates (Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 29, 2015 N 266(as amended by the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of July 7, 2021 № 762)): Construction and civil engineering; Geodesy and land management; Hydraulic engineering, water engineering and water technologies; Environmental protection technologies; Systems analysis; Branch mechanical engineering; Economics; Management; Marketing; Entrepreneurship, trade and exchange activities.

The scientific journal "Automotive roads and road construction" is published by the decision of the Academic Council of the National Transport University (**protocol № 3 from 26.03.2026**).

The Scientific and Technical Journal "Automobile Roads and Road Construction" is published according to the decision of the National transport university Academic council. Printed copies are distributed among: state and leading libraries of Ukraine, leading road-transport trend educational, scientific, research and design institutions; highways and airfields construction, reconstruction, repair and maintenance enterprises; organizations in which the publications with main results of the dissertation work must be send. By orders of the Ministry of Education and Science of Ukraine of November 30, 2021 № 1290 and of April 7, 2022 № 320 the scientific journal is included in the register of scientific publications of Ukraine (Category B).

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Савенко В.Я., д.т.н., професор, (головний редактор), НТУ (Київ); **Гришук О.К.**, к.т.н., професор, (заступник головного редактора), НТУ (Київ); **Славінська О.С.**, д.т.н., професор, (заступник головного редактора), НТУ (Київ); **Батракова А.Г.**, д.т.н., професор, (заступник головного редактора), ХНАДУ (Харків); **Петрович В.В.**, к.т.н., професор, старший науковий співробітник, (відповідальний секретар), НТУ (Київ);

Відповідальні редактори: **Бакалінський О.В.**, д.е.н., професор, НТУ (Київ); **Барабаш О.В.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Белінська Я.В.**, д.е.н., професор, ДПУ, (Київська обл., м. Ірпінь); **Бондар Н.М.**, д.е.н., професор, НТУ (Київ); **Волк П.П.**, д.т.н., професор, НУВГП (Рівне); **Воркут Т.А.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Гамеляк І.П.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Губар Ю.П.**, д.т.н., доцент, Національний університет «Львівська політехніка», ННІ «Інститут геодезії», (Львів); **Гуржій Н.М.**, д.е.н., професор, ЗНУ, (Запоріжжя); **Дмитрієва О.І.**, д.т.н., професор, ХНАДУ (Харків); **Кравчук А.М.**, д.т.н., професор, КНУБА (Київ); **Ложачевська О.М.**, д.е.н., професор, НТУ (Київ); **Мамонов К.А.**, д.е.н., професор, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова (Харків); **Матейчик В.П.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Могилюк С.Г.**, д.т.н., професор, ПДАБА (Дніпро); **Мозговий В.В.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Приймак Н.С.**, д.е.н., професор, ДНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського (Кривий Ріг); **Сахно В.П.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Хрутьба В.О.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Цимбалюк С.О.**, д.е.н., професор, КНЕУ імені Вадима Гетьмана (Київ); **Шматков Г.Г.**, д.б.н., професор, ПДАБА (Дніпро);

Технічні редактори: **Бондаренко Л.П.**, к.т.н., доцент, НТУ (Київ); **Усиченко О.Ю.**, к.т.н., професор; **Харченко А.М.**, д.т.н., професор; **Чечуга О.С.**, к.т.н., доцент.

РЕДАКТОРИ

Базиліук А.В., д.е.н., професор, НТУ (Київ); **Безверхий О.І.**, д.ф.-м.н., професор, НТУ (Київ); **Безуглий А.О.**, к.е.н., доцент, ДП «Національний інститут розвитку інфраструктури ДП «НІРІ» (Київ); **Бедункова О.О.**, д.б.н., професор, НУВГП (Рівне); **Бондаренко Е.Л.**, д.геогр.н., професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ); **Бубела А.В.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Будник В.А.**, к.е.н., професор, ДУІТ (Київ); **Внукова Н.В.**, д.т.н., професор, ХНАДУ (Харків); **Волк Л.Р.**, к.т.н., доцент, НУВГП (Рівне); **Гавриленко В.В.**, д.ф.-м.н., професор, НТУ (Київ); **Гасенко Л.В.**, к.т.н., доцент, Херсонський державний аграрно-економічний університет, (Кропивницький); **Гончаренко Ф.П.**, к.т.н., доцент, ДП "Український державний інститут з проектування об'єктів дорожнього господарства" (Київ); **Гречан А.П.**, д.е.н., професор, НТУ (Київ); **Дмитриченко А.М.**, к.т.н., доцент, НТУ (Київ); **Єрмаков В.М.**, д.т.н., доцент, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, (Київ); **Жданюк В.К.**, д.т.н., професор, ХНАДУ (Харків); **Зінченко А.Ю.**, к.т.н., доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», (Київ); **Золотарьов В.О.**, д.т.н., професор, ХНАДУ (Харків); **Зубрецька Н.А.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Іванік О.М.**, д.геол.н., професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ); **Іванченко В.О.**, д.е.н., доцент, ДП «Національний інститут розвитку інфраструктури ДП «НІРІ» (Київ); **Ільченко В.Ю.**, к.е.н., доцент, НТУ (Київ); **Каськів В.І.**, к.т.н., доцент, ДП «Національний інститут розвитку інфраструктури ДП «НІРІ» (Київ); **Кирель Н.В.**, д.т.н., професор, ХНАДУ (Харків); **Кириленко О.М.**, д.е.н., професор, НАУ (Київ); **Кириченко І.Г.**, д.т.н., професор, ХНАДУ (Харків); **Кірічек Ю.О.**, д.т.н., професор, ПДАБА (Дніпро); **Кіяшко І.В.**, к.т.н., професор, ХНАДУ (Харків); **Ковальчук В.П.**, д.т.н., головний науковий співробітник, Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України, (Київ); **Кузлю М.Т.**, д.т.н., професор, НУВГП (Рівне); **Кузьминенко М.П.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Литвиненко Т.П.**, к.т.н., доцент, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (Полтава); **Ловеїкін В.С.**, д.т.н., професор, НУБП (Київ); **Лоза І.А.**, д.ф.-м.н., професор, НТУ (Київ); **Ломотько Д.В.**, д.т.н., професор, УДУЗТ (Харків); **Лукьянова В.В.**, к.хім.н., доцент, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», старший науковий співробітник відділу ядерно-фізичних технологій (Київ); **Луньов А.О.**, к.т.н., доцент, ДУ «Житомирська політехніка», (Житомир); **Луньова О.В.**, д.т.н., професор, ДУ «Житомирська політехніка», (Житомир); **Ляшенко Д.О.**, д.геогр.н., доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ); **Маланчук М.С.**, к.т.н., доцент, НУ «Львівська політехніка» ННІ «Інститут геодезії», (Львів); **Малахова Ю.А.**, к.е.н., доцент, НТУ (Київ); **Мамчур В.А.**, д.е.н., Національний науковий центр «Інститут аграрної економіки», (Київська область, смт. Чабани); **Марчук О.В.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Меленчук Т.М.**, д.т.н., професор, Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса); **Мельник Т.С.**, д.е.н., АТ «Українська залізниця»,

Департамент закупівель, головний фахівець сектору категорійних стратегій управління категорійного менеджменту (Київ); **Мішутін А.В.**, д.т.н., професор, ОДАБА (Одеса); **Могильний С.Г.**, д.т.н., професор, ПДАБА (Дніпро); **Мусійко В.Д.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Нагайчук В.М.**, к.т.н., доцент, ДП “Національний інститут розвитку інфраструктури ДП «НІРІ” (Київ); **Неизвестна Н.В.**, к.т.н., доцент, НТУ (Київ); **Оксень Є.І.**, д.т.н., професор, НТУ (Київ); **Пеньков В.О.**, к.т.н., доцент, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова (Харків); **Петрович О.З.**, к.б.н., доцент, Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, (Київ); **Петрук Р.В.**, д.т.н., професор, ВНТУ (Вінниця); **Разумова К.М.**, д.е.н., професор, НАУ (Київ); **Рожок Л.С.**, д.ф.-м.н., професор НТУ (Київ); **Романенко В.Д.**, д.т.н., професор, Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; **Руженський М.М.**, к.е.н., доцент, НТУ (Київ); **Семенчук Т.Б.**, к.е.н., доцент, ДУІТ, (Київ); **Семко О.В.**, д.т.н., професор, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (Полтава); **Соколова Н.М.**, к.е.н., доцент, НТУ (Київ); **Толмачев С.М.**, д.т.н., професор, ХНАДУ (Харків); **Угненко Є.Б.**, д.т.н., професор, УДУЗТ (Харків); **Ужвієва О.М.**, к.т.н., доцент, УДУЗТ (Харків); **Файнлейб О.М.**, член-кореспондент НАН, д.хім.н., професор, Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України (Київ); **Харута В.С.**, к.т.н., професор, НТУ (Київ); **Барвінська-Мавайович Анна** – професор, надзвичайний, доктор хабілітований у галузі економічних наук, завідувач кафедри економіки та міжнародних відносин Інституту економіки та фінансів Жешувського університету, м. Жешув, (Польща); **Ванюшин В.О.**, кандидат ділового адміністрування, доцент, Університет Умео, Школа бізнесу, економіки та статистики, Умео, (Швеція); **Джаваріні Карло**, професор, професор кафедри промислової та технологічної хімії Університету "La Sapienza" (Італія); **Рената Котиня**, професор, РЛ, Лодзинський технологічний університет (Лодзинська Політехніка), факультет Будівництва, Архітектури та Інженерії середовища, (Польща); **Вень Мінмін**, доктор філософії, декан відділу управління персоналом (Китай); **Солдо Божо**, д.т.н., завідувач кафедри цивільного будівництва, (Хорватія); **Сужделите Вісоцкене Юрате**, д.т.н., професор, Вільнюський технічний університет Гедимінаса, факультет екологічної інженерії Начальник кафедри геодезії та кадастру Департамент геодезії та кадастру Вільнюс (Литва); **Телтаєв Багдат Бурханбайули**, доктор технічних наук, професор, президент КаздорНДІ, (Казахстан); **Хаджі Ріхеб**, доктор філософії, кафедра наук про Землю, Університет Ферхата Аббаса Сетіфа, 19000 Сетіф, (Алжир); **Хазанович Лев**, професор Піттсбурзького університету, факультет цивільної та екологічної інженерії, (США); **Хамед Юнес**, д.т.н., доцент факультету наук Гафса FSGF Департамент наук про Землю, (Туніс); **Хаммум Ферхат**, директор лабораторії матеріалів для транспортної інфраструктури (Франція).

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Савенко В.Я., д.т.н., професор, (голова); **Гришук О.К.**, к.т.н., професор, (заступник голови); **Славінська О.С.**, д.т.н., професор, (заступник голови); **Батракова А.Г.**, д.т.н., професор, (заступник голови); **Петрович В.В.**, к.т.н., професор, старший науковий співробітник, (секретар); **Бакалінський О.В.**, д.е.н., професор; **Барабаш О.В.**, д.т.н., професор; **Белінська Я.В.**, д.е.н., професор, **Бондар Н.М.**, д.е.н., професор; **Волк П.П.**, д.т.н., професор; **Воркут Т.А.**, д.т.н., професор; **Гамеляк І.П.**, д.т.н., професор; **Губар Ю.П.**, д.т.н., доцент; **Гуржій Н.М.**, д.е.н., професор; **Дмитрієва О.І.**, д.т.н., професор; **Каськів В.І.**, к.т.н., доцент; **Козак Л.С.**, к.е.н., професор; **Кравчук А.М.**, д.т.н., професор; **Ложачевська О.М.**, д.е.н., професор; **Мамонов К.А.**, д.е.н., професор, **Матейчик В.П.**, д.т.н., професор; **Мозговий В.В.**, д.т.н., професор; **Приймак Н.С.**, д.е.н., професор; **Сахно В.П.**, д.т.н., професор; **Хрутьба В.О.**, д.т.н., професор; **Цимбалюк С.О.**, д.е.н., професор; **Шматков Г.Г.**, д.б.н., професор; **Бондаренко Л.П.**, к.т.н., доцент; **Усиченко О.Ю.**, к.т.н., професор; **Харченко А.М.**, д.т.н., професор; **Чечуга О.С.**, к.т.н., доцент.

Електронна копія наукового журналу “Автомобільні дороги і дорожнє будівництво” розміщується на сайті Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського НАН України у розділі “Наукова періодика України” (для періодичних друкованих наукових фахових видань), на [сайті](#) Національного транспортного університету і [сайті](#) наукового журналу «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво».

© Національний транспортний університет, 2026
© Колектив авторів

EDITORIAL BOARDYU

Savenko Vyacheslav Ya., Dr.Sci.Tech., Professor, (Editor-in-Chief), NTU (Kyiv); **Hryshchuk Oleksandr K.** PhD (Candidate of Technical Sciences), Professor, (Deputy Editor-in-Chief), NTU (Kyiv); **Slavinska Olena S.**, Dr.Sci.Tech., Professor, (Deputy Editor-in-Chief), NTU (Kyiv); **Batrakova Angelika G.**, Dr.Sci.Tech., Professor, (Deputy Editor-in-Chief), KhNADU (Kharkiv); **Petrovich Volodymyr V.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Professor, Senior Researcher, (Executive Secretary), NTU (Kyiv);

Responsible editors: **Bakalinsky (Bakalinskyi) Oleksandr V.**, Dr.Sci.Econ., Professor, NTU (Kyiv); **Barabash Olena V.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NTU (Kyiv); **Belinska Yanina V.**, Dr.Sci.Econ., Professor, State Tax University, (Kyiv region, Irpin); **Bondar Natalia M.**, Dr.Sci.Econ., Professor, NTU (Kyiv); **Volk Pavlo P.**, Dr.Sci.Tech., Professor, NUVGP (Rivne); **Vorkut Tetiana A.**, Dr.Sci.Tech., Professor, NTU (Kyiv); **Gamelyak Igor P.**, Dr.Sci.Tech., Professor, NTU (Kyiv); **Hubar Yurii P.**, Dr.Sci.Tech., Associate Professor, NU "Lviv Polytechnic" (Lviv); **Hurzhyi Nataliia M.**, Dr.Sci.Econ., Associate Professor, ZNU (Zaporizhzhya); **Dmytriieva Oksana I.**, Dr.Sci.Tech, Professor, KhNADU (Kharkiv); **Kravchuk Andriy M.**, Dr.Sci.Tech, Professor, KNUBA (Kyiv); **Lozhachevska Olena M.**, Dr.Sci.Econ., Professor, NTU (Kyiv); **Mamonov Konstantin A.**, Doctor of Economics, Professor, O.M. Beketov KhNUMG (Kharkiv); **Mateichyk Vasyl P.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NTU (Kyiv); **Mozgovyi Volodymyr V.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NTU (Kyiv); **Pryimak Nataliia S.**, Dr.Sci.Econ, Professor, DNUET named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, (Kryvyi Rih); **Sakhno Volodymyr P.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NTU (Kyiv); **Khrutba Victoria O.**, Dr.Sci.Tech., Professor, NTU (Kyiv); **Tsybaliuk Svitlana O.**, Dr.Sci.Econ., Professor, KNEU named after Vadym Hetman, (Kyiv); **Shmatkov Gryhorii G.**, Dr.Sci. in Biology, Professor, PDABA (Dnipro);

Technical editors: **Bondarenko Ludmila P.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, NTU (Kyiv); **Usichenko Olena Y.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Professor, NTU (Kyiv); **Kharchenko Anna M.**, Dr.Sci.Tech., Professor NTU (Kyiv); **Cechuha Oleksandr S.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor NTU (Kyiv).

EDITORS

Bazyliuk Antonina V., Dr.Sci.Econ., Professor, NTU (Kyiv); **Bezverkhy Oleksandr I.**, Dr.Sci.Phys.-math, Professor, NTU (Kyiv); **Bezugly Artem O.**, PhD (Cand. of Economic Sciences), Associate Professor, SE "National Institute for Infrastructure Development SE "NIRI" (Kyiv); **Biedunkova Olha O.**, Dr.Sci. in Biology, Associate Professor, NUVGP (Rivne); **Bondarenko Eduard L.**, Dr.Sci. in Geography, Professor, NTU, Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv); **Bubela Andrii V.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NTU (Kyiv); **Budnyk Viktoriia A.**, PhD (Cand. of Economic Sciences), Professor, DUIT (Kyiv); **Vnukova Natalia V.**, Dr.Sci.Tech, Professor, KhNADU (Kharkiv); **Volk Liubov R.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, NUVGP (Rivne); **Gavrilenko Valery V.**, Dr.Sci.Phys.-math, Professor, NTU (Kyiv); **Gasenko Lina V.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, Kherson State agrarian and economic University, (Kropyvnytskyi); **Goncharenko Fedir P.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, SE "Ukrainian State Institute for Design of Road Facilities" (Kyiv); **Grechan Alla P.**, Dr.Sci.Econ., Professor, NTU (Kyiv); **Dmytrychenko Andrii M.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, NTU (Kyiv); **Yermakov Viktor M.**, Dr.Sci.Tech, Director's intercessor Institute of Ecological Safety and Management at the State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management (Kyiv); **Zhdanyuk Valery K.**, Dr.Sci.Tech, Professor, KhNADU (Kharkiv); **Zinchenko Artem Yu.**, Ph.D., Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", (Kyiv); **Zolotarev Viktor O.**, Dr.Sci.Tech, Professor, KhNADU (Kharkiv); **Zubretska Natalia A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, NTU (Kyiv); **Ivanik Olena M.**, Dr.Sci.Geol., Professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, (Kyiv); **Ivanchenko Vitalii O.**, Dr.Sci.Econ., Associate Professor National Institute for Infrastructure Development (NIRI) (Kyiv); **Ilchenko Viktoriia Yu.**, PhD (Cand. of Economic Sciences), Associate Professor, NTU (Kyiv); **Kaskiv Volodymyr I.**, Ph.D., Associate Professor, SE "National Institute for Infrastructure Development SE "NIRI" (Kyiv); **Kyrel Natalia V.**, Dr.Sci.Tech, Professor, KhNADU (Kharkiv); **Kyrylenko Oksana M.** Dr.Sci.Econ., Professor of NAU (Kyiv); **Kyrychenko Igor G.**, Dr.Sci.Tech, Professor, KhNADU (Kharkiv); **Kirichek Yuriy O.**, Dr.Sci.Tech, Professor, PDABA (Dnipro); **Kiyashko Igor V.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Professor, KhNADU (Kharkiv); **Kozak Lyudmila S.**, Candidate of Economic Sciences, Professor, NTU (Kyiv); **Kovalchuk Volodymyr P.**, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Institute of Water Problems and Land Reclamation of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, (Kyiv); **Kuzlo Mykola T.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NUVGP (Rivne); **Kuzminets Mykola P.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NTU (Kyiv); **Lytvynenko Tetyana P.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, National University "Poltava Polytechnic named after Yuri Kondratyuk", (Poltava); **Loveikin Viacheslav S.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NUBP (Kyiv); **Loza Igor A.**, Dr.Sci.Phys.-math, Professor, NTU (Kyiv); **Lomotko Denis V.**, Dr.Sci.Tech, Professor, UDUZT (Kharkiv); **Lukianova Vitalina V.**, PhD (Candidate of Chemistry Sciences), Associate Professor, SI «Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine», Senior Researcher, Department Of Nuclear Physics, (Kyiv); **Lunov Andrii O.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr); **Lunova Oksana B.**, Dr.Sci.Tech, Professor, Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr); **Lyashenko Dmytro O.**, Dr.Sci. in Geography, Associate Professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv); **Malanchuk Maria S.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, Polytechnic National University, Institute of Geodesy (Lviv); **Malakhova Yulia A.**, Ph.D Economics, Associate Professor of Department of Management, NTU (Kyiv); **Mamchur Volodymyr A.**, Dr.Sci.Econ., National Scientific Centre "Institute of Agrarian Economics", Deputy Director for Research and Innovation, (Kyiv region, town Chabany); **Marchuk Oleksandr V.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NTU (Kyiv); **Melnychuk Tetyana M.**, Dr.Sci.Tech, Professor, Odesa Polytechnic National University (Odessa); **Melnyk Tetiana S.**, Dr.Sci.Econ., Joint Stock Company «Ukrainian Railways», Procurement Department, Chief specialist of the sector of categorical strategies of category management department (Kyiv); **Mishutin Andrii V.**, Dr.Sci.Tech, Professor, ODABA (Odessa); **Mogilny Serhii G.**, Dr.Sci.Tech, Professor, PDABA (Dnipro); **Musiiko Volodymyr D.**, Dr.Sci.Tech, Professor, NTU (Kyiv); **Nagaichuk Vasyl M.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, SE "National Institute for Infrastructure

Development SE "NIRI" (Kyiv); **Neizvestna Natalia V.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, NTU (Kyiv); **Oksen Yevhen I.**, Dr. Sci. Tech., Professor, State Enterprise «Research Institute of Building Structures» (Kyiv); **Penkov Volodymyr O.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, KhNUMG. OHM. Beketova (Kharkiv); **Petrovych Olesya Z.**, PhD (Candidate of Biology Sciences), Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, (Kyiv); **Petruk Roman V.**, Dr.Sci.Tech, Associate Professor, VNTU, (Vinnitsa); **Razumova Kateryna M.**, Dr.Sci.Econ., Professor of NAU (Kyiv); **Rozhok Liliia S.**, Dr.Sci.Phys.-math, Professor, NTU (Kyiv); **Romanenko Viktor D.**, Dr.Sci.Tech, Professor, Educational and Scientific Complex "Institute of Applied Systems Analysis" of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, (Kyiv); **Ruzhenskyi Maksym M.**, PhD (Cand. of Economic Sciences), Associate Professor, NTU (Kyiv); **Semenchuk Tetiana B.**, PhD (Cand. of Economic Sciences), Associate Professor, DUIT (Kyiv); **Semko Olexandr V.**, Dr.Sci.Tech, Professor, National University "Poltava Polytechnic named after Yuri Kondratyuk", (Poltava); **Sokolova Natalia M.**, PhD (Cand. of Economic Sciences), Associate Professor, NTU (Kyiv); **Tolmachev Serhiy M.**, Dr.Sci.Tech, Professor, KhNADU (Kharkiv); **Ugненко Yevheniia B.**, Dr.Sci.Tech, Professor, UDUZT (Kharkiv); **Uzhviyeva Elena M.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, UDUZT (Kharkiv); **Finelabe Olexandr M.**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences, Dr.Sci. in Chemistry, Professor, Institute of Chemistry of Macromolecular Compounds of the NAS of Ukraine (Kyiv); **Kharuta Vitalii S.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Professor, NTU (Kyiv); **Yakovyshyna Tetana F.**, Dr.Sci.Tech, Professor, PDABA (Dnipro); **Barwińska-Malajowicz Anna** – prof. nadzw. dr hab. w obszarze nauk ekonomicznych, Kierownik Katedry Ekonomii i Międzynarodowych Stosunków Ekonomicznych, Instytut Ekonomii i Finansów, Uniwersytet Rzeszowski, (Polska); **Vanyushin Volodymyr O.**, Doctor of Business Administration, Associate Professor, Umeå University, School of Business, Economics and Statistics, Umeå, (Sweden); **Wen Mingming**, Ph.D., Dean of the Human resource management Department, (China); **Giavarini Carlo**, Prof. Full professor of Industrial and Technological Chemistry of "La Sapienza" University in (Italia); **Renata Kotynia**, Prof. PŁ, Lodz University of Technology (Łódź Polytechnic), Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, (Polska); **Soldo Bozho**, Ph.D., Head of Department of civil Engineering, (Croatia); **Sužiedelytė Jūratė Višockienė**, Prof. Dr. Vilnius Gediminas Technical University, Faculty of Environmental Engineering Head of Department Geodesy and Cadastre Department of Geodesy and Cadastre Vilnius (Lithuania); **Teltayev Bahdat Burkhanbayuly**, Dr.Sci.Tech. (Dr. of Techn. Sciences), Professor, President of Kazdor Research Institute, Professor of the Kazakh Automobile and Road Academy L.B. Honcharova (Kazakhstan); **Hadji Riheb**, Ph.D., Department of Earth Sciences, Ferhat Abbas University of Setif, 19000 Setif, (Algeria); **Khazanovich Lev**, Professor at University of Pittsburgh, Department of Civil and Environmental Engineering, (USA); **Hamed Younes**, Ph.D., Associate Professor, Faculty of Science of Gafsa FSGF Department of Earth Sciences, (Tunisia); **Hammoum Ferhat**, Directeur du laboratoire Matériaux pour les Infrastructures de Transport, (France).

EDITORIAL BOARD

Savenko Vyacheslav Ya., Dr.Sci.Tech., Professor, (Chairman); **Hryshchuk O.K.** PhD (Candidate of Technical Sciences), Professor, (Deputy Chairman); **Slavinska Olena S.**, Dr.Sci.Tech., Professor, (Deputy Chairman); **Batrakova Angelika G.**, Dr.Sci.Tech., Professor, (Deputy Chairman); **Petrovich Volodymyr V.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Professor, Senior Researcher, (Secretary); **Bakalinsky (Bakalinskyi) Olexandr V.**, Dr.Sci.Econ., Professor; **Barabash Olena V.**, Dr.Sci.Tech, Associate Professor; **Belinska Yanina V.**, Dr.Sci.Econ., Professor; **Bondar Natalia M.**, Dr.Sci.Econ., Professor; **Volk Pavlo P.**, Dr.Sci.Tech., Professor; **Vorkut Tetiana A.**, Dr.Sci.Tech., Professor; **Gamelyak Igor P.**, Dr.Sci.Tech., Professor; **Hubar Yurii P.**, Dr.Sci.Tech., Associate Professor; **Hurzhyi Nataliia M.**, Dr.Sci.Econ., Professor; **Dmytriieva Oksana I.**, Dr.Sci.Tech, Professor; **Kaskiv Volodymyr I.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor; **Kozak Liudmyla S.**, Dr.Sci.Econ., Professor; **Kravchuk Andriy M.**, Dr.Sci.Tech, Professor; **Lozhachevska Olena M.**, Dr.Sci.Econ., Professor; **Mamonov Konstantin A.**, Dr.Sci.Econ., Professor; **Mateichyk Vasyl P.**, Dr.Sci.Tech, Professor; **Mogilny Serhii G.**, Dr.Sci.Tech, Professor; **Mozgovyi Volodymyr V.**, Dr.Sci.Tech, Professor; **Pryimak Nataliia S.**, Dr.Sci.Econ, Professor; **Sakhno Volodymyr P.**, Dr.Sci.Tech, Professor; **Khrutba Victoria O.**, Dr.Sci.Tech., Professor; **Tsymbaliuk Svitlana O.**, Dr.Sci.Econ., Professor; **Shmatkov Gryhorii G.**, Dr.Sci. in Biology, Professor; **Bondarenko Ludmila P.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor; **Usichenko Olena Yu.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Professor; **Kharchenko Anna M.**, Dr.Sci.Tech., Professor; **Chechuha Olexandr S.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor.

An electronic copy of the scientific journal "Automotive roads and road construction" is available on the website of the V. I. Vernadskyi National Library of Ukraine of the National Academy of Sciences of Ukraine in the "Scientific periodicals of Ukraine" section (for periodical printed scientific publications), on the website of the National Transport University and the website of the scientific journal "Automotive roads and road construction".

© National Transport University, 2026
© The team of authors

ЗМІСТ

G2 ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Крюковський О.М., Ляшенко Я.Г.	15
Прогнозування забруднення довкілля асфальтобетонними заводами на основі математичного моделювання в умовах кліматичної нестабільності	
Федоров В.В., Корпач О.А., Яценко Д.М., Босенко В.М.	28
Низькочастотний звукопоглинальний екран	

G11 МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЄЮ)

Драгобецький В.В., Мороз М.М., Молоштан Д.В., Черниш А.А., Нікітіна А.В.	37
Розробка методу визначення пластичних деформацій кузовних деталей транспортного засобу при зіткненні	
Нестер А.А.	50
Охорона праці громадян України в машинобудівній промисловості чеської республіки	
Кульбовський І.І., Любарець І.О.	59
Інтелектуальні моделі та методи навігації та експлуатації контейнеровозів	
Левківський С.А., Ющенко М.М., Тригубець О.М.	74
Інтелектуальна система виявлення вибухонебезпечних предметів при механізованих земляних роботах	
Ткачук М.С., Чечуга О.С.	87
Математична модель інтелектуалізації комп'ютерних систем управління критично важливими об'єктами	

G18 ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ

Мамонов К.А., Гой В.В., Бубела А.В.	100
Інформаційно-аналітичне забезпечення оцінки рівня формування та використання геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури: теоретичні аспекти	
Ватуля Г.Л., Радзінська Ю.Б.	107
Транспортна інфраструктура у системі геоecологічного моніторингу відбудови земель	
Юрченко В.О., Телюра Н.О., Кватадзе А.І.	114
Визначення геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури: теоретичні підходи	

Воронков О.О., Кухар М.А., Маслій Л.О.	121
Методи компенсації іоносферної затримки GNSS-сигналів: порівняння та перспективи застосування	
Нестеренко Г.Б.	132
Вплив реконструкції індивідуальних житлових будинків на актуальність відомостей містобудівного кадастру	
Нестеренко С.Г., Байструк О.В., Демочко І.О., Мусієнко К.А.	143
Індикатори геоекологічної безпеки постраждалих територій територіальних громад	

G19 БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

Алексєєнко В.О.	152
Провідні економічні стратегії впровадження заходів оновлення будівельних підприємств через проєкт цільового реінжинірингу	
Баран С. А., Андрієвський І.П.	165
Сучасні дослідження напівтепліх сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти	
Бондаренко Л.П., Скоропадський В.В.	184
Експериментальні дослідження закономірностей впливу золи-винесення на властивості ґрунтових шарів	
Гамеляк І.П., Журавський Д.Л.	199
Ефективність відновлення цементобетонного дорожнього покриття при використанні шарів зношування	
Ілляш С.І., Зеленовський В.А., Райковський В.Ф.	213
Досвід застосування триланкових автопоїздів із загальною довжиною понад 25 м у міжнародних вантажних перевезеннях	
Кузло М.Т., Авдєєв М.О.	223
Динаміка депресійної поверхні у тілі ґрунтових споруд під час зниження рівня води у водоймищі	
Кулінко Є.О., Погосов О.Г., Пасічник П.О., Габа К.О., Пашкова Л.В.	230
Комп'ютерне моделювання теплового потоку підлогових конструкцій по ґрунту будівель логістичної інфраструктури	
Левіщенко О.С., Дзюба О.М., Нищенко В.В.	238
Аналіз ролі інженерів-консультантів в умовах контрактної моделі FIDIC крізь призму сталого розвитку	
Мартинюк І.Ю., Максим'юк Ю.В., Кузьмінець М.П.	249
Підходи та інструментарій моделювання процесів організаційно-технологічного спостереження за забезпеченням стабільної та безперервної роботи системи будівельних інженерних мереж	

Мозговий В.В., Левківська Л.В., Шевчук Л.В., Феценко А.М.	262
Математичні методи оцінки залишкового ресурсу дорожніх покриттів після зими та їх відновлення	
Мороз В.С.	273
Полімерна добавка «AVE18» VELETON™ для модифікації бітумів: науково-технічне обґрунтування ефективності у порівнянні з SBS	
Оксень Д.Є., Оксень Є.І.	285
Комплексна методика автоматизованого візуального обстеження цементобетонних дорожніх покриттів з шаром зношування на основі нейронної мережі YOLOV8-SEG для систем предиктивної діагностики та управління інфраструктурою	
Петрович В.В., Петрович І.В., Савенко С.С., Чечуга Є.С., Юрчук В.В.	298
Методика оцінки стійкості насипів з урахуванням їх напруженого стану	
Савенко В.Я., Усиченко О.Ю., Плитус Р.М., Харін П.Л.	314
Визначення розрахункових параметрів георешіток для числового моделювання в Plaxis 2D	
Соколова Н.М., Стадник В.С.	324
Оцінка впливу факторів на формування ринкових цін на будівельні матеріали та виробу	
Тетера В.С., Циркунова К.В., Жданюк В.К.	332
Порівняльні дослідження адгезійних властивостей дорожнього бітуму, модифікованого добавками серії «АДБІТ»	
Ткаченко В.В., Козарчук І.А.	341
Дослідження ефективності повторного використання балок прогонової будови під час будівництва тимчасових мостів	

18 АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

Галак І.І., Костюченко О.В., Денисенко І.О., Лола М.В.	353
Ключові аспекти управління реверсивними потоками оборотної тари в ланцюгах постачання в умовах циркулярної економіки	
Галицький Б.Ю., Спіцина А.Є.	369
Методологічні підходи до оцінки конкурентного потенціалу автотранспортних підприємств в умовах кризи та нестабільності	
Добровольська А.М., Дерезгуз І.А.	383
Систематизація та оцінювання ризиків інформаційної безпеки в системах логістичного обслуговування	
Литвишко Л.О., Кравчук І.В.	394
Концептуальна модель взаємодії стейкхолдерів мультимодального проєкту транспортного підприємства	

Малахова Ю.А., Самойленко Є.С., Гребельник М.М.	412
Забезпечення конкурентоспроможності та економічної безпеки транспортних підприємств шляхом впровадження сучасних інформаційних технологій	
Порфіренко В.І., Козаченко А.І.	420
Управлінські інноваційні рішення з розвитку мережі логістичних поставок: ретроспектива та прогноз	
Хобта М.О., Сукманюк В.М., Третьак Д.С.	432
Статистичний аналіз розвитку транзитної інфраструктури України в умовах євроінтеграції та війни	
Цимбал С.В., Макарова Т.В., Варчук В.В.	444
Чинники формування та оцінка логістичного потенціалу автомобільних перевізників бетонних сумішей в умовах міської агломерації	

CONTEN

G2 ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES

Oleksandr Kriukovsky, Yana Liashenko	15
Forecasting environmental pollution by asphalt concrete plants based on mathematical modeling in conditions of climate instability	
Volodymyr Fedorov, Oleksii Korpach, Dmytro Yashchenko, Volodymyr Bosenko	28
Low-frequency sound-absorbing screen	

G11 MECHANICAL ENGINEERING (SPECIALISATION)

Volodymyr Dragobetskyi, Mykola Moroz, Dmytro Moloshtan, Andrii Chernysh, Alyona Nikitina	37
Development of a method for determining plastic deformations of vehicle body parts during collision	
Anatoliy Nester	50
Occupational safety of ukrainian citizens in the machine-building industry of the czech republic	
Ivan Kulbovskyi, Ihor Liubarets	59
Intelligent models and methods for navigation and operation of container ships	
Sergii Levkivskyi, Mykola Yushchenko, Oleksandr Tryhubets	74
Intelligent system for detecting explosive objects during mechanized earthworks	
Mykola Tkachuk, Oleksandr Chechuga	87
Mathematical model of intellectualization of computer control systems for critical infrastructure objects	

G18 SURVEYING AND LAND MANAGEMENT

Kostiantyn Mamonov, Vasyl Goi, Andriy Bubela	100
Information and analytical support for assessing the level of development and use of geo-ecological monitoring of land restoration in transport infrastructure: theoretical aspects	
Glib Vatulia, Yuliia Radzinska	107
Transport infrastructure in the geo-ecological monitoring system for land restoration	
Valentyna Iurchenko, Natalia Teliura, Alina Kvatadze	114
Definition of geo-ecological monitoring of land restoration in transport infrastructure: theoretical approaches	

Oleksii Voronkov, Maksym Kukhar, Lubov Maslii	121
Methods of compensation of ionospheric delay of gnss signals: comparison and prospects of application	
Galuna Nesterenko	132
Reconstruction of individual residential houses: implications for urban cadastre data accuracy	
Serhii Nesterenko, Oleksandra Bastruk, Ivan Demochko, Musiienko Kostiantyn	143
Indicators of geoecological safety of affected territories of territorial communities	

G19 CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING

Vladyslav Aleksieienko	152
Leading economic strategies for implementing renewal measures in construction contracting enterprises through a targeted reengineering project. Research hypothesis	
Serhii Baran, Ihor Andriievskiy	165
Current research on high rap half-warm mix asphalt	
Liudmyla Bondarenko, Viktor Skoropadskiy	184
Experimental research on the patterns of fly ash influence on the properties of soil layers	
Igor Gameliak, Demyan Zhuravskiy	199
Efficiency of restoration of cement concrete pavements using wearing courses	
Ilyash Sergey, Zelenovskiy Volodymyr, Raikovskiy Vitalii	213
Experience in the use of three-link trains with a total length of more than 25 m in international freight transport	
Mykola Kuzlo, Maksym Avdeev	223
Dynamics of the phreatic surface in the body of earth structures during drawdown of water level in a reservoir	
Yevhen Kulinko, Oleksandr Pohosov, Pavlo Pasichnyk, Kristina Gaba, Pashkova Larysa	230
Computer modeling of heat flow in floor structures on the Ground of logistics infrastructure buildings	
Olena Levishchenko, Oksana Dziuba, Vladyslav Nyshenko	238
Analysis of the consultant engineer's role in the fidic contractual framework within the paradigm of sustainable development	
Ivan Martyniuk, Yurii Maksymiuk, Mykola Kuzminets	249
Approaches and tools for modeling organizational and technological monitoring processes to ensure stable and continuous operation of building engineering network systems	

Volodymyr Mozgovyi, Liudmyla Levkivska, Liudmyla Shevchuk, Anna Feschenko	262
Mathematical model of technological operations attending drivage of the Deep curvilinear bore-holes	
Vadym Moroz	273
Modern approaches to ensuring pavement durability in the absence of major repairs	
Dmytro Oksen, Yevgeny Oksen	285
Comprehensive methodology of automated visual inspection of cement concrete road pavement with wear layer based on the yolov8-seg neural network for predictive diagnostics and infrastructure management systems	
Volodymyr Petrovych, Ihor Petrovych, Sergey Savenko, Chechuha Yevhen, Yurchuk Vitaly ...	298
Methodology for assessing the stability of embanks taking into account their stressed state	
Vyacheslav Savenko, Olena Usychenko, Rostyslav Plytus, Pavlo Kharin	314
Determination of design parameters of geogrids for numerical modelling in plaxis 2D	
Natalia Sokolova, Viacheslav Stadnyk	324
Assessment of the impact of factors on the formation of market prices for building materials and products.	
Vladyslav Tetera, Kateryna Tsyrkunova, Valeriy Zhdaniuk	332
Comparative research of the Adhesive properties of road bitumen modified with additives of the “Adbit” series	
Vladislav Tkachenko, Kozarchuk	341
Research on the efficiency of reusing span beams in the construction of temporary bridges	

J8 ROAD TRANSPORT

Iryna Halak, Oksana Bilonoh, Olena Tkachenko, Denys Ovchar	353
A methodological approach to analyzing the Implementation of corporate social responsibility of logistics providers in the Context of the Sustainable development goals	
Bohdan Galytsky, Angelina Spitsyna	369
Methodological approaches to assessing the Competitive potential of road transport enterprises in conditions of crisis and instability	

Anna Dobrovolska, Igor Derehuz	383
Systematization and assessment of information security risks in logistics service systems	
Liliia Lytvyshko, Ivan Kravchuk	394
Conceptual model of stakeholder engagement in a multimodal transport enterprise projects	
Yuliia Malakhova, Yevhen Samoilenko, Mykola Hrebelnyk	412
Ensuring competitiveness and economic security of transport enterprises through the implementation of modern information technologies	
Volodymyr Porfirenko, Anastasiia Kozachenko	420
Management innovation solutions for the Development of logistics supply chain: retrospective and forecast	
Mykhailo Khobta, Victoria Sukmaniuk, Dmytro Tretiak	432
Statistical analysis of the Development of ukraine's transit infrastructure in the Conditions of european integration and war	
Serhiy Tsymbal, Tamara Makarova, Vyacheslav Varchuk	444
Factors of formation and assessment of the Logistics potential of road carriers of concrete mixtures in urban agglomeration	

УДК 625.7/.8:504:519.6
UDC 625.7/.8:504:519.6

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-015-027

**FORECASTING ENVIRONMENTAL POLLUTION BY ASPHALT CONCRETE PLANTS
BASED ON MATHEMATICAL MODELING IN CONDITIONS OF CLIMATE INSTABILITY**

**ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННИМИ
ЗАВОДАМИ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В УМОВАХ
КЛІМАТИЧНОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ**



Kriukovsky Oleksandr, postgraduate student of the Department of Transport Construction and Property Management of the National Transport University, e-mail: kriukovsky@gmail.com, tel. +380442803942,

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



Liashenko Yana, PhD in Physics and Mathematics, State University "Kyiv Aviation Institute", Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, e-mail: Ya_Lyashenko@ukr.net, tel. +380444067323

<https://orcid.org/0000-0002-7772-7879>

Abstract. The theoretical and practical aspects of predicting the dispersion of harmful impurities in atmospheric air in conditions of modern climatic instability are explored in this paper. The fundamental principles of mathematical modeling of emissions from asphalt concrete plants (ACPs) are analyzed, in particular, the features of the application of the Gaussian plume model and the OND-86 methodology. The main focus is on identifying methodological gaps in current environmental impact assessment (EIA) procedures, which are based on static meteorological parameters and do not take into account the risks caused by anomalous “heat waves”.

Based on a real industrial facility (an asphalt mixing plant in Vinnytsia region), a series of numerical experiments were performed to simulate the distribution of nitrogen dioxide (NO₂) in a wide temperature range (from -10 to +40 °C). The modeling results demonstrated that extreme heat is a critical factor caused the increase of ground-level concentrations of the pollutant and the approach of the pollution epicenter to the emission source.

The practical part of the investigation was implemented through cartographic visualization of concentration fields with reference to the topography of settlements. It has been proved that at abnormally high air temperatures (+40 °C and above), a decrease in the effective emission height is observed due to a decrease in the thermal gradient, which can lead to the coverage of residential buildings with concentrations that significantly exceed the regulatory MAC (Maximum Allowable Concentration).

A scientifically based strategy for adaptive management of asphalt concrete plants (ACP) is proposed, which involves dynamic adjustment of technological cycles and the implementation of predictive air basin monitoring systems. The conclusions of the work can be used to improve environmental regulations and justify the boundaries of sanitary protection zones of road industry enterprises.

Keywords: mathematical modeling, forecasting, Gauss's model, asphalt concrete plant, dispersion of harmful impurities, numerical experiment, climatic instability, stratification parameters, environmental risk, sanitary protection zone, adaptive environmental management.

Introduction. In the context of active development and restoration of the road and transport network, asphalt concrete plants (ACP) perform a key role in supporting the construction industry. It courses to an increase in the number and productivity of agricultural enterprises, many of which operate in close proximity to settlements or are mobile and frequently change location. Such intensive use is necessary for the economy, but creates permanent and growing environmental pressure.

According to the Law of Ukraine "On Environmental Impact Assessment", the activities of ACP belong to the category of facilities that may have a significant impact on the environment and require obligatory environmental impact assessment (EIA) procedures before the beginning of their operation or reconstruction [1]. The EIA procedure is a comprehensive analysis aimed at determining the potential impact of a factories on ecosystems and populations. A critically important element of this process is a mathematical modeling, since the calculated forecast allows us to establish a spatial illustration of the distribution of pollutants and make reasoned decisions regarding environmental safety.

Despite the obligatory EIA procedure, the modern practice of environmental regulation and environmental impact assessment of asphalt concrete plants in Ukraine faces a serious challenge due to the inconsistency of traditional calculation models with real climate change.

The main problem is that actual methods for predicting the dispersion of harmful substances are based on static meteorological parameters that do not take into account the anomalous temperature regimes that are increasingly observed in the summer period. The increase of the frequency of "heat waves" with temperatures above +35 - +40 °C radically changes the thermodynamics of the ground-level layer of the atmosphere, causing a decrease in the effective height of emissions and their intensive "pressing" to the earth's surface.

The situation is complicated by the high density of development around industrial sites. Traditional calculations of sanitary protection zones, performed based on average statistical indicators, turn out to be irrelevant during periods of extreme heat, when the zone of maximum pollution shifts closer to the source and covers residential areas with a higher concentration of impurities.

Thus, an sharp scientific and practical contradiction arises between the necessity to ensure guaranteed environmental safety of the population and the limitations of the existing forecasting tools, which requires a transition to adaptive modeling taking into account modern climatic extremes.

The problem of modeling atmospheric dispersion and estimation the impact of industrial facilities on the environment is a subject of active discussion in the modern scientific community. The issue of applying Gaussian models and their adaptation to complex meteorological conditions is considered in detail in the fundamental works of Zannetti P. [2] and Stockie J. M. [3], which laid the mathematical foundation for understanding the dynamics of a smoke plume and calculating ground-level concentrations. Modern foreign studies, in particular the works of Li X. та Hu X.-M. [4] and Pu X., Wang T. J., Huang X., Ding A. J., Zhou D. R. [5], indicate that global climate change, in particular anomalous "heat waves", significantly change the turbulence of the ground-level layer of the atmosphere. This makes static calculations using traditional methods, such as OND-86 [6], less accurate, as they do not fully take into account the thermal suppression of flare rise. The issue of the impact of asphalt concrete plants as specific sources of pollution was investigated by Oreto C. et al. [7], focusing on the risks from emissions of nitrogen oxides and particulate matter within the life cycle of road mix production.

In the Ukrainian scientific segment, a significant contribution to the development of methods of environmental monitoring and modeling was made by scientists Belyaev M. M. [8] (development of numerical models of impurity distribution), Vasylenko L. A. [9] (environmental safety of road construction) and Gunchenko O. M. [10]. However, despite a significant number of works, the issue of quantitative assessment of the impact of extreme temperatures (+40 °C) on the reduction of the dispersion distance (X_{max}) for road sector facilities in Ukraine remains insufficiently covered, which makes this study relevant.

The purpose of the study is to predict the levels of atmospheric air pollution by emissions from asphalt concrete plants under conditions of climate instability and to substantiate adaptive measures to minimize environmental risk for nearby territories based on mathematical modeling.

To achieve the goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. To justify the choice of mathematical apparatus and algorithm for modeling the dispersion of emissions from industrial sources (asphalt concrete plants).
2. Perform mathematical modeling of nitrogen dioxide dispersion in a wide temperature range (from -10 °C to +40 °C) to identify regularities in changes in ground-level concentrations.
3. To investigate the spatial transformation of the impact zone and the configuration of the emission flare under the influence of extremely high air temperatures.
4. Perform cartographic modeling of the impact zones of a real ACP with a direct connection to the actual coordinates of the object and the surrounding residential area to estimate real risks for the population.
5. To substantiate a complex of adaptive environmental protection measures (technological, monitoring and planning) aimed at minimizing the negative impact of ACP on residential areas during periods of abnormal weather phenomena.

Presentation of the main research material and the obtained results.

Forecasting atmospheric pollution from asphalt concrete plants (ACP) based on mathematical modeling is an important tool for assessing environmental impact, planning environmental protection measures, and monitoring compliance with regulations. The purpose of modeling is to determine the maximum surface concentrations of pollutants at various distances from the emission source and estimate the compliance of these concentrations with maximum allowable concentrations (MAC). This modeling is a obligatory step for developing an emissions permit and determining the size of the sanitary protection zone (SPZ).

Since the ACP is a complex source of pollution, mathematical modeling should include the following key steps:

1. Collection of initial data.

1.1 Characteristics of the ACP: productivity, features of the technological process, type of fuel, availability and efficiency of dust and gas cleaning units, etc.

1.2 Emission data: identification and inventory of emission sources, actual or estimated emission capacities (M) for all main pollutants.

1.3 Meteorological data: wind speed and direction, temperature, atmospheric stability class (usually for the entire calculation period).

1.4 Geographic data: topography of the area (taking into account relief), data on buildings and structures for calculating aerodynamic flow.

2. Construction or adaptation of a mathematical model.

3. Calculation: determination of the field of pollutant concentrations at different points around the ACP.

4. Analysis of results.

4.1 Comparison of calculated maximum ground-level concentrations with maximum permissible concentrations (MAC).

4.2 Definition of the sanitary protection zone (SPZ).

4.3 Assessment of the contribution of the SPZ to overall atmospheric air pollution and development of measures to reduce the impact (for example, increasing the height of pipes, increasing the efficiency of gas purification equipment, improving the technological process, etc.).

The most widespread and simplest model for predicting the spread of impurities in the atmosphere is the Gauss's Plume Model. This model is well suited for predicting the dispersion of emissions from point sources (smokestacks) over open and flat terrain over relatively short distances (up to 10–20 km).

The Gauss's model is based on the following key assumptions:

1. Point source: Pollution emanates from a single point source (pipe) located at an effective height H .

2. Permanent emission: The emission rate (M) and meteorological conditions (wind speed u) are constant (do not change over time).

3. Gauss's distribution: The distribution of impurity concentration in the cross-section of the smoke plume (perpendicular to the wind direction) obeys the normal distribution law (Gauss's law).

4. Reflection from the ground: The earth's surface is considered to be perfectly reflective (pollutants are not absorbed, but reflected).

Within the Gauss's model, the concentration C at any point (x,y,z) from a point source (chimney) is defined as [2]:

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \right], \quad (1)$$

where Q is the emission power (mass of impurity per unit time, g/s);

u is the average wind speed, m/s;

H_e is the effective emission height, m;

$\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$ are dispersal parameters (standard deviations) in the horizontal and vertical directions, depending on the distance x and the atmospheric stability class.

In equation (1), the first exponent $\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right)$ defines the horizontal dispersion (across the wind).

The maximum concentration is always on the axis of the emission plume ($y=0$).

The second exponent $\left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \right]$ defines the vertical dispersion.

The first term $\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right)$ is the actual Gauss's distribution around the effective height H .

The second term $\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right)$ is the imaginary source, which is used to model the total reflection

of the pollutant from the earth's surface ($z=0$).

For the most of environmental assessments, the most important calculation is the ground-level concentrations along the axis of the flare.

Putting $z=0$ (earth's level) and $y=0$ (wind direction) into the general formula, we get:

$$C(x,0,0) = \frac{M}{\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{H^2}{z \sigma_z^2(x)}\right). \quad (2)$$

The key task of environmental forecasting is to determine the maximum ground-level (at a level of 2 m from the ground) concentration C_{max} and the distance x_{max} at which it is achieved. Analysis of formula (2) allows us to make the following conclusions:

1. At short distances ($x \rightarrow 0$) the concentration C is zero, since the flare is located high.

2. At large distances ($x \rightarrow \infty$) the concentration C approaches zero, as the plume is dispersed over a large area.

3. The maximum ground-level concentrations C_{max} is reached at a certain optimal distance X_{max} , where the flare has time to descend to the earth, but has not yet completely dispersed.

The effective height (H_e) is the sum of the physical height of the pipe (H) and the additional flare lift (ΔH) caused by the kinetic energy and buoyancy (temperature) of the exhaust gases [3]:

$$H_e = H + \Delta H. \quad (3)$$

The larger the value H_e , then better the initial dispersal occurs and the lower the concentration in the ground-level layer will be. The flare lift ΔH is a complex parameter and is calculated using empirical formulas (e.g., Holland, Briggs formulas) that take into account the temperature of the gases, the outlet velocity, and the wind speed.

The main limitations for the application of the Gauss's model are the following:

1. Flat terrain (the model works poorly in conditions of complex buildings or mountainous terrain).
2. Non-stationarity (it cannot model changes in meteorological conditions in time).
3. Chemistry (it does not take into account chemical transformations of impurities (for example, oxidation of SO_2 NO_x)).

However, the Gauss's model is an ideal tool for:

1. Assessing the impact of ACP emissions on surrounding residential areas.
2. Designing chimneys (determining the minimum required height H).
3. Establishing sanitary protection zones (SPZ) around the plant.

Although the Gauss's model is fundamental, its direct application in engineering calculations is complicated by the necessity for permanent monitoring of the turbulent characteristics of the atmosphere σ_y and σ_z . In order to make the environmental impact assessment (EIA) process universal and accessible, Gauss's physical principles were transformed into empirical methods of the simplified calculation, such as the OND-86 method.

This approach is based on the principle of determining the worst-case scenario. Instead of calculating the concentration for each wind change, the technique immediately determines the maximum surface concentration ($C_{\max}$) that can occur under the most adverse meteorological conditions (the so-called "dangerous wind speed").

For a single point source with a round mouth (for example, an ACP pipe), the maximum concentration formula has the form [6], mg/m^3 :

$$C_{\max} = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (4)$$

where A is a coefficient, depending on the temperature stratification of the atmosphere at which the concentration of harmful substances in the air is maximum, $\text{sec}^{2/3} \text{degree}^{1/2} \text{mg/g}$;

M is the mass of harmful impurity emitted into the atmosphere, g/sec ;

F is the dimensionless coefficient that takes into account the settling velocity of harmful substances in atmospheric air;

m, n are the coefficients that take into account the conditions of the gas-air mixture exiting the source;

η is the dimensionless coefficient that takes into account the influence of the terrain;

H is the height of the emission source above ground level, m ;

V_1 is the gas-air mixture flow rate, m^3/sec ;

ΔT is the difference between the temperature of the gas-air mixture emitted into the atmosphere and the temperature of the ambient air, $^\circ\text{C}$.

The distance from the emission source at which the ground-level concentration reaches its maximum value under adverse meteorological conditions is determined by the formula [6], m :

$$X_{\max} = \frac{5-F}{4} dH, \quad (5)$$

where the dimensionless coefficient d is determined by the formulas given in [6].

The advantage of the application the mathematical model (4) – (5) is the possibility of scenario modeling, which allows assessing environmental risks at the design or modernization stage of production. Due to the variation of input parameters (such as discharge temperature, gas velocity or meteorological conditions), the model becomes a tool for short-term and long-term forecasting. This makes it possible to determine the boundaries of the enterprise's impact zones under different climate scenarios, in particular under anomalous temperature conditions, which are becoming increasingly frequent due to global climate change.

To verify the theoretical provisions and estimation the real impact of the asphalt concrete plant (ACP) on the state of atmospheric air, a numerical experiment was conducted based on models (1) - (3). Within the framework of the investigation, special attention was paid to the analysis of the impact of ambient air temperature on dispersion processes, since the parameter directly correlates with the lifting force of the flare and, accordingly, with the level of ground-level concentration of pollutants.

Based on the presented methodology, a series of numerical calculations were carried out for a test source of emissions from an asphalt concrete plant. The object of the study was an asphalt concrete plant chimney with the following characteristics: height $H = 20\text{m}$, mouth diameter $d_0 = 1.2\text{ m}$, gas outlet velocity $v_0 = 5.80\text{m/sec}$ at a mixture temperature $T_{\text{mixture}} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nitrogen dioxide NO_2 with an emission rate of $M = 3\text{g/sec}$ and a background pollution level $C_{bg} = 0.01\text{ mg/m}^3$ was defined as the target impurity. Calculations were performed for flat terrain conditions $\eta = 1$ with an atmospheric stratification coefficient $A = 180$. The control criterion was the value of the greatest one-time limited permissible concentration MPS_{se} for NO_2 , which is 0.085 mg/m^3 .

The aim of the experiment was to establish the dependence of the maximum ground-level concentration of the pollutant and the distance to reach it on the ambient temperature T , $^{\circ}\text{C}$.

The scenario modeling covered a wide temperature range from -10°C to $+40^{\circ}\text{C}$, which not only reflects the typical annual temperature course in a temperate climate, but also takes into account current trends in global climate change. The study paid particular attention to a scenario with an extreme temperature of $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Including such anomalous temperature in the model allowed us to establish peak levels of anthropogenic load, which is critically important for predicting environmental risks during periods of prolonged "heat waves".

Table 1 – Results of ground-level pollutant concentration modeling under various temperature conditions

Таблиця 1 – Результати моделювання приземної концентрації забруднюючих речовин за різних температурних умов

Experiment	Air temperature, $^{\circ}\text{C}$	Maximum ground-level concentration, mg/m^3	Distance at which maximum is reached, m	Dangerous wind speed, m/sec
1	-10	0,143	256,15	2,26
2	-5	0,144	252,97	1,97
3	0	0,146	249,07	1,93
4	5	0,148	245,00	1,89
5	10	0,151	240,75	1,85
6	15	0,154	236,28	1,80
7	20	0,158	231,58	1,75
8	25	0,162	226,62	1,70
9	30	0,168	221,34	1,65
10	35	0,174	215,70	1,59
11	40	0,182	209,62	1,53

Given the increasing frequency and intensity of anomalous meteorological phenomena in Ukraine, this approach allows us to simulate the worst-case scenario of impurity dispersion, when traditional impact assessment methods may underestimate the real threat. This transforms the model from a statistical calculation tool to a means of adaptive environmental forecasting, capable of taking into account the instability of climatic parameters and ensuring the sustainability of the environmental safety of adjacent territories even under extreme conditions.”

The modeling results are presented in Table 1 and Figure 2.

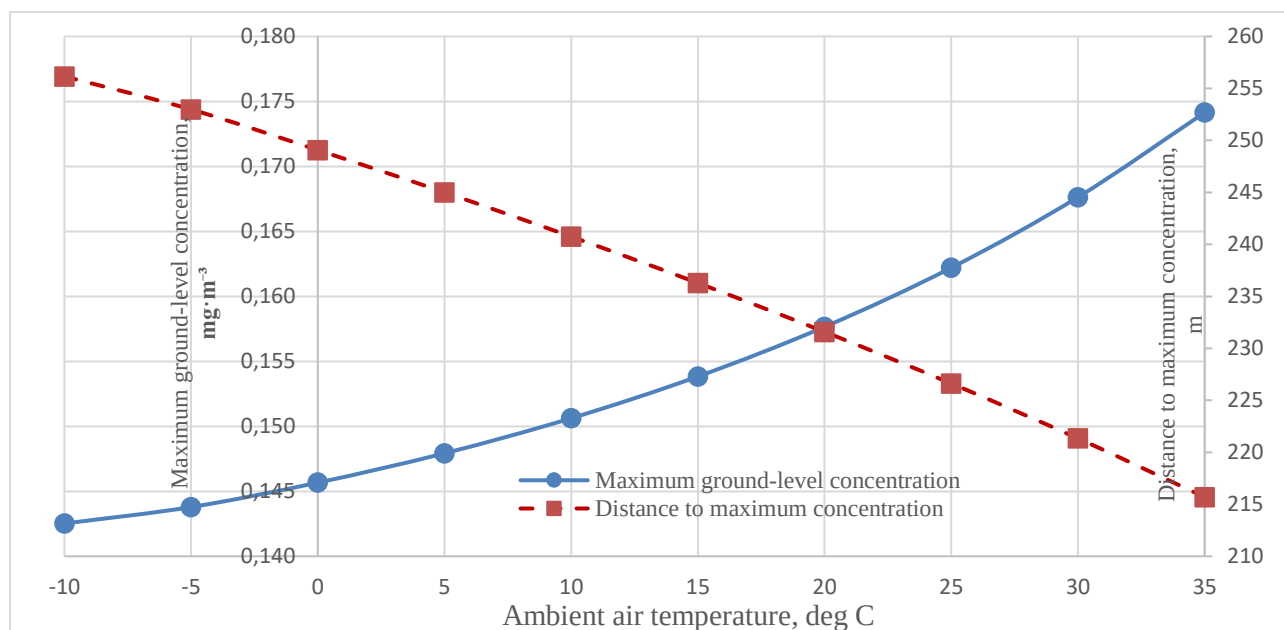


Figure 1 – Dependence of maximum ground-level pollutant concentration and its peak distance on air temperature

Рисунок 1 – Залежність максимальної приземної концентрації забруднювача та відстані її досягнення від температури повітря

As can be seen from Fig. 1, there is a direct correlation between air temperature and the level of ground-level concentration (blue line), while the distance to the maximum point (red line) has an inverse relationship - it decreases when air masses are heated.

A complex analysis of the obtained data allows us to establish the following patterns:

Dynamics of ground-level concentration. A nonlinear increasing dependence of the pollution level on the ambient temperature has been established. When the anomalous summer temperature of +40 °C is reached, the maximum ground-level concentration increases to 0.182 mg/m³, which is 27.3% higher compared to the winter minimum (0.143 mg/m³). Physically, this can be explained by a critical decrease in the temperature difference between exhaust gases and atmospheric air, which eliminates the effect of thermal lift of the flare and worsens the conditions for its dispersion.

Spatial shift of the risk zone. An inverse dependence between air temperature and the distance up to reach the maximum $X_{\max}$ was found. In the extreme scenario (+40 °C), the zone of maximum pollution shifts 46.53 m closer to the emission source compared to winter conditions - from 256.15 m to 209.62 m. It indicates an increase in environmental load directly near the industrial site boundary in hot weather.

Transformation of critical meteorological parameters. Calculations indicate a significant decrease in the “dangerous wind speed” from 2.26 m/sec in winter to a minimum value of 1.53 m/sec during abnormal heat. It means that in summer, conditions of extreme pollution are formed with significantly weaker air flows, which increases the risks of accumulation of harmful substances in the ground-level layer.

Thus, a comparative analysis of scenarios proves that the temperature maximum (+40 °C) is the most critical period for the operation of ACP. The combination of a 27.3% increase in concentration, an approach of the maximum zone to the source by almost 47 m, and a decrease in dangerous wind speed requires the implementation of adaptive environmental forecasting and taking into account summer indicators as estimated when establishing the boundaries of sanitary protection zones. The establishment of the boundaries of sanitary protection zones should be based not on average annual indicators, but on predicted extreme temperature scenarios.

To compare analysis of the dynamics of NO₂ dispersion, the spatial graphs of ground-level concentrations dispersal were constructed for two extreme scenarios: winter minimum (Experiment 1, -10 °C) and extreme summer maximum (Experiment 11, +40 °C).

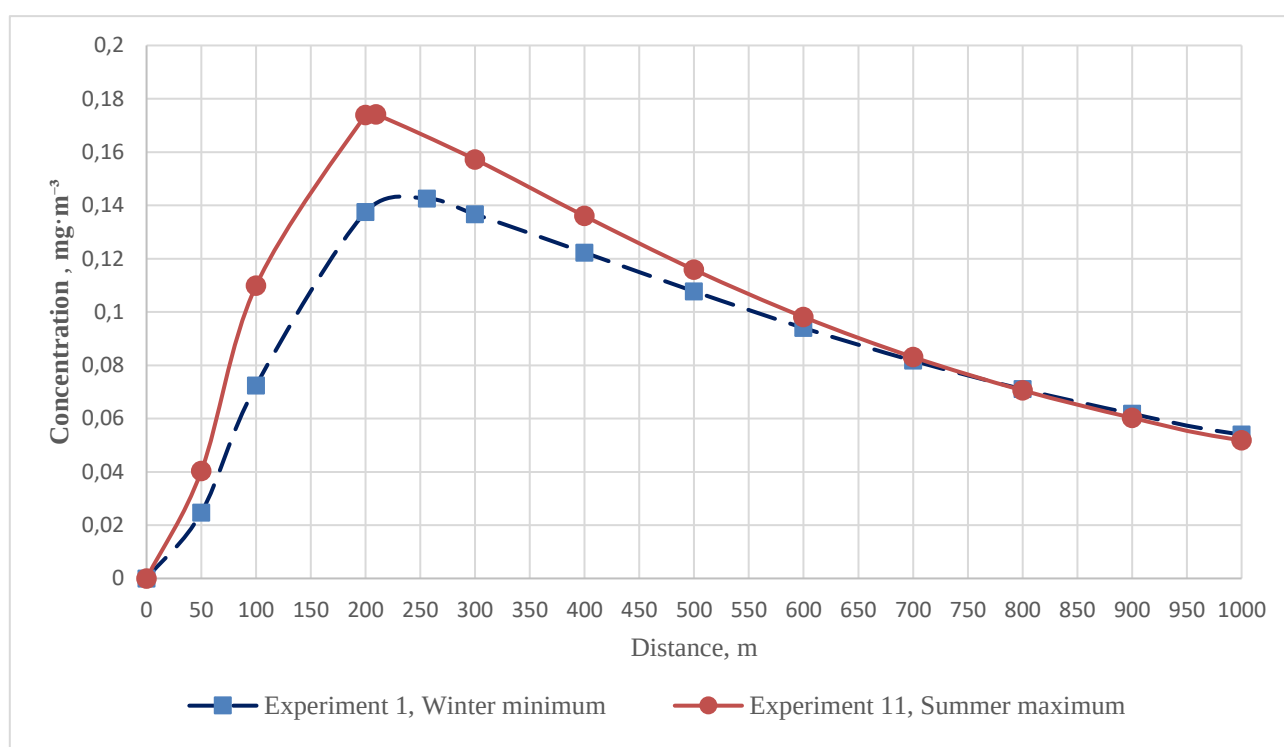


Figure 2 – Distribution of NO₂ ground-level concentration along the plume axis for extreme scenarios (winter minimum and summer maximum)

Рисунок 2 – Розподіл приземної концентрації NO₂ по осі факелу викиду для граничних сценаріїв (зимовий мінімум та літній максимум)

An analysis of Figure 2 allows us to compare two critical atmospheric states. The red line (summer maximum) demonstrates a higher pollution intensity and a shift of the zone of maximum impact closer to the source, which confirms the greater environmental hazard of emissions in the hot period of the year.

Moreover, analysis of the graphs (Fig. 2) allows us to establish the following regularities:

Transformation of the amplitude and shape of the emission flare. At an abnormally high temperature (+40 °C), the dispersion curve is characterized by a much steeper rise and higher amplitude. The maximum concentration value of 0.182 mg/m³ is reached faster and is significantly higher than the winter indicator.

Shift of the pollution epicenter. The graph confirms clearly the effect of the flare “pressing” to the ground in hot conditions. The point of maximum pollution shifts towards the source by 46.53 m (from 256.15 m to 209.62 m).

Expansion of the zone of exceeding the MAC. Analysis of the intersection of the curves with the MAC isoline equaled to 0.085 mg/m^3 demonstrates a critical change in safe distances. If in winter the concentration decreases below the standard at a distance of about 680–700 m, then in extreme heat ($+40^\circ\text{C}$) the zone of exceeding the MAC expands, covering a larger area of the surrounding territory.

Long-range dynamics. Starting from a distance of 800 m, concentrations under different temperature scenarios gradually level off, but in the range of 100–700 m (which is critical for residential development), the summer scenario demonstrates consistently higher pollution levels.

The next stage of scenario modeling was the study of the spatial distribution of nitrogen dioxide concentrations, taking into account wind directions. This allows us to establish the real configuration of the enterprise’s impact zone on the surrounding buildings.

The basis for conducting a numerical experiment was the calculation of emission dispersion parameters from the chimney of the asphalt mixing plant of a real asphalt concrete plant (ACP) located in Vinnytsia region based on model (4) – (5). To ensure maximum reliability of the results, the modeling was carried out with a direct reference to the actual location of the industrial site and the surrounding topography. Taking into account the geographical coordinates of the source allowed not only to calculate theoretical concentrations, but also to visualize the directions of spread of nitrogen dioxide (NO_2) pollution in the immediate vicinity of settlements (Demydivka, Mogylivka, Hnivan).

Temperature extremes typical for this region of Ukraine, in particular, abnormal heat of up to $+40^\circ\text{C}$, which corresponds to current trends in global climate change, were taken as a bases.

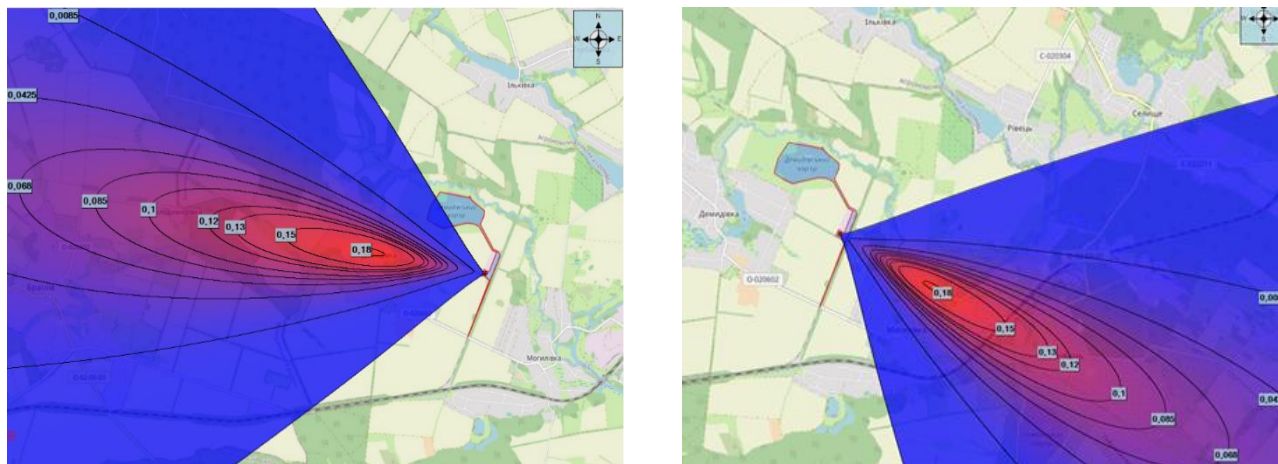


Figure 3 – Modeling of the asphalt plant’s impact zone on the residential areas of settlements (Demydivka, Mohylivka, Hnivan) under various wind directions and extreme conditions (temperature $+40^\circ\text{C}$, dangerous wind speed)

Рисунок 3 – Моделювання зони впливу АБЗ на селітебні забудови населених пунктів (Демидівка, Могилівка, Гнівань) при різних напрямках вітру за найбільш екстремальних умов (температура $+40^\circ\text{C}$, небезпечна швидкість вутру)

As can be seen in Fig. 3, the zone of maximum pollution directly covers the residential areas of the settlements of Demydivka, Mohylivka and Hnivan.

Integration of numerical modeling with terrain maps confirms that modern climate changes in Ukraine (increased periods of abnormal heat) make the existing boundaries of the SPZ insufficient to fully protect the residents of Demydivka and Hnivan.

It clearly demonstrates the summer period is the time of maximum risk, when the pollution flare “presses” on the ground and covers a larger area of settlements with higher NO₂ concentrations.

Geometry of pollution fields. The constructed isolines of concentrations $C(x, y)$ demonstrate that during abnormal heat the emission flare becomes more intense and localized. The pollution core with concentrations of 0.15–0.18 mg/m³ (which is 1.8–2.1 times higher than the MAC) is concentrated directly in the ground-level layer along the axis of wind spread.

Impact on residential development in the settlement of Demydivka. With a westerly wind direction, a plume of pollution with a concentration of more than 0.12 mg/m³ directly covers the eastern part of the settlement. In particular, it has been established that the MAC (0.085 mg/m³) under such conditions shifts deep into the residential area, creating an excessive load on residential development.

Environmental risks for the settlements of Hnivan and Mogilevka. Modeling with a north-westerly wind represented that the emissions of the ACP form a zone of persistent pollution in the direction of Hnivan and Mogilevka. Taking into account the previously identified regularity of expanding the distance of influence in the summer (see Fig. 2), it was found that the isolines of concentrations 0.085–0.1 mg/m³ can reach the borders of these settlements, which requires special attention to the plant’s operating schedules on hot days.

Based on the obtained modeling results, which confirmed the increase of ground-level concentrations by 27.3% and the approach of the maximum zone to the residential areas of Demydivka and Hnivan during “heat waves”, the following set of adaptation measures for the ACP can be proposed during the most dangerous temperature maxima:

1. Adjustment of the operating mode of the enterprise:

Temperature regulation. During periods of extreme heat (at air temperatures above +30 - +35 °C), it is recommended to transfer the most intensive production cycles to night or early morning, when the temperature gradient contributes to better dispersion of impurities.

Capacity management. If the reaching the critical mark of +40 °C and the fixing of a weak wind (about 1.53 m/s), it is necessary to consider the possibility of temporarily reducing production volumes to prevent the formation of zones with a NO₂ concentration above 0.182 mg/m³ in residential areas.

2. Implementation of an adaptive monitoring system:

Predictive modeling. It is recommended to implement an early warning system that, based on weather forecasts, will determine the risks of flare direction in settlements (in this specific example, Demydivka or Hnivan).

Location of monitoring posts. Installation of automated air quality sensors should be carried out in the sectors of greatest risk identified during modeling (in this case, at a distance of about 210 m from the source in the direction of the prevailing summer winds).

3. Urban planning and engineering solutions:

Adaptation of SPZ. When establishing the boundaries of sanitary protection zones for new or reconstructed sanitary protection zones, it is necessary to use the maximum air temperature as a calculation scenario, but not the average annual indicators, since exactly during abnormal heat the pollution flare is “pressed” to the ground most intensively.

Phytofiltration barriers. Creation of multi-tiered forest belts on the border of the industrial site (in this example, towards the settlements of Demydivka and Hnivan) for additional air turbulence and mechanical sedimentation of particles.

The implementation of the proposed recommendations will allow to transform the environmental management system of the enterprise into an adaptive management format capable of effectively responding to the challenges associated with climate change in Ukraine.

Conclusions and recommendations. Based on the calculations and modeling, it is possible to make a general conclusion that climate changes in Ukraine, which are manifested as an extreme summer temperatures, directly worsen the state of atmospheric air in the zone of influence of the ACP. It requires the calculation of sanitary protection zones not according to average, but according to the extremum meteorological parameters to ensure guaranteed environmental safety of the population.

The obtained results allow us to make the following conclusions:

1. The methodological limitation of traditional approaches to environmental impact assessment (EIA), which are based on average meteorological indicators, has been proved. Ignoring temperature extremes is established to lead to a significant underestimation of real environmental risks for nearby residential areas.

2. A direct correlation was found between the temperature of the atmospheric air and the level of ground-level pollution. According to the results of mathematical modeling, it was established that with an increase in temperature from -10 °C to +40 °C, the maximum ground-level concentration of nitrogen dioxide (NO₂) increases by 27.3% (from 0.143 mg/m³ to 0.182 mg/m³), which is due to a decrease in the effect of the thermal underground flare.

3. In conditions of “heat waves” (+40 °C), the point of maximum pollution ($X_{\max}$) shifts closer to the industrial site compared to the winter period. This causes the effect of “pressing” the emission plume to the ground, which increases the toxic load directly at the border of the sanitary protection zone.

4. Based on cartographic modeling with reference to the area (Demydivka, Mohylivka, Hnivan), zones of potential exceedance of the MAC were visualized. It was proved that under unfavorable wind directions and temperature above +35 °C, the pollution flare directly covers residential buildings, creating an excessive load on the population.

5. The necessity to transition to adaptive environmental management of ACPZ is substantiated. The introduction of temperature regulations (power limitation at $T > +35$ °C), predictive monitoring systems, and the creation of multi-tiered phytofiltration barriers to protect residential areas have been proposed.

6. It is recommended to review approaches to establishing the boundaries of sanitary protection zones (SPZ) for new road sector facilities, using as a calculation scenario not average annual, but predicted extreme summer air temperatures, which corresponds to current trends in climate change in Ukraine.

Thus, the developed and tested mathematical modeling methodology confirms its ability to provide high reliability in predicting the environmental impact of ACP, which is a necessary condition for the resistant development of road infrastructure and ensuring environmental safety.

References

1. Pro otsinku vplyvu na dovkillia : Zakon Ukrainy vid 23.05.2017 № 2059-VIII. Redaktsiia vid 01.01.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>.
2. Zannetti P. Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software. Van Nostrand Reinhold, 1990. 444 p. <https://guariso.faculty.polimi.it/AESA/Air%20Pollution%20Modeling.pdf>
3. Stockie J. M. The mathematics of atmospheric dispersion modeling. SIAM Review. 2011. Vol. 53, №. 2. P. 349–372 <https://surl.li/xdtmfu>
4. Li X., Hu X.-M., Ma Y., Wang Y., Li L.-G., Zhao Z.-Q. Impact of planetary boundary layer structure on the formation and evolution of air-pollution episodes in Shenyang, Northeast China. Atmospheric Environment. 2019. Vol. 214. 116850. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116850>
5. Pu X., Wang T. J., Huang X., Ding A. J., Zhou D. R. Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region. Science of The Total Environment. 2017. Vol. 603–604. P. 807–816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.056>
6. Metodyka rozrakhunku kontsentratsii v atmosferному povitri shkidlyvykh rehovyn, shcho mistiatsia u vykydakh pidpriemstv (OND-86) (Methodology for calculating concentrations of harmful substances in atmospheric air contained in enterprise emissions (OND-86)), 1987. 160 s. [in Ukrainian].
7. Oreto C., Russo F., Veropalumbo R., Viscione N., Biancardo S. A., Dell'Acqua G. Life Cycle Assessment of Sustainable Asphalt Pavement Solutions Involving Recycled Aggregates and Polymers. Materials. 2021. Vol. 14, № 14. 3867. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14143867>
8. Bieliaiev M. M., Hunko O. Yu., Rostovykov V. S. Matematychni modeliuvannia rozpovsiudzhennia vidpratsovanykh haziv avtotransportu na prymahistralnykh terytoriakh (Mathematical modeling of the

exhaust gases distribution from motor vehicles in roadside territories). Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya. 2021. Vyp. 2 (38). S. 5–14 [in Ukrainian]

9. Vasylenko L. A., Panov Yu. L. Ekolohichna bezpeka ob'ektiv dorozhnogo budivnytstva: suchasni vyklyky ta metody otsinky (Environmental safety of road construction objects: modern challenges and assessment methods). Dorohy i mosty. 2022. Vyp. 25. S. 78–89 [in Ukrainian].

10. Hunchenko O. M. Monitorynh ta modeliuvannya stanu atmosferneho povitria v zonakh vplyvu promyslovykh pidpriemstv (Monitoring and modeling of the state of atmospheric air in the impact zones of industrial enterprises). Tekhnogenno-ekolohichna bezpeka. 2020. № 7. S. 44–52 [in Ukrainian].

11. Informatsiinyi biuleten pro stan dovkillia u Vinnytskii oblasti (Information bulletin on the state of the environment in the Vinnytsia region). Departament ekolohii ta pryrodnykh resursiv Vinnytskoi ODA [in Ukrainian]. URL: <http://www.vin.gov.ua/dep-eko>.

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННИМИ ЗАВОДАМИ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ

Крюковський Олександр Миколайович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету, e-mail: kriukovsky@gmail.com, тел.+380442803942, <https://orcid.org/0009-0009-7730-0486>

Ляшенко Яна Григорівна, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна, e-mail: Ya_Lyashenko@ukr.net, тел.+380444067323, <https://orcid.org/0000-0002-7772-7879>

Анотація. У статті досліджено теоретичні та практичні аспекти прогнозування розсіювання шкідливих домішок в атмосферному повітрі в умовах сучасної кліматичної нестабільності. Проаналізовано фундаментальні принципи математичного моделювання викидів асфальтобетонних заводів (АБЗ), зокрема особливості застосування Гауссової моделі факела та методики ОНД-86. Основну увагу приділено виявленню методологічних прогалин у чинних процедурах оцінки впливу на довкілля (ОВД), які базуються на статичних метеорологічних параметрах і не враховують ризики, спричинені аномальними «хвилями тепла».

На базі реального промислового об'єкта (асфальтозмішувальної установи у Вінницькій області) виконано серію чисельних експериментів, що моделюють розповсюдження діоксиду азоту (NO₂) у широкому температурному діапазоні (від -10 до +40 °C). Результати моделювання продемонстрували, що екстремальна спека є критичним фактором, який зумовлює зростання приземних концентрацій забруднювача та наближення епіцентру забруднення до джерела викиду.

Практична частина дослідження реалізована через картографічну візуалізацію полів концентрацій з прив'язкою до топографії населених пунктів. Доведено, що за аномально високих температур повітря (+40 °C і вище) спостерігається зниження ефективної висоти викиду внаслідок зменшення термічного градієнта, що може призводити до накриття житлової забудови концентраціями, які значно перевищують нормативні показники ГДК.

Запропоновано науково обґрунтовану стратегію адаптивного менеджменту АБЗ, яка передбачає динамічне коригування технологічних циклів та впровадження систем прогностичного моніторингу повітряного басейну. Висновки роботи можуть бути використані для вдосконалення екологічних регламентів та обґрунтування меж санітарно-захисних зон підприємств дорожньої галузі.

Ключові слова: математичне моделювання, прогнозування, Гауссова модель, асфальтобетонний завод, розсіювання шкідливих домішок, чисельний експеримент, кліматична нестабільність, параметри стратифікації, екологічний ризик, санітарно-захисна зона, адаптивний екологічний менеджмент.

Перелік посилань

1. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII. Редакція від 01.01.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>.
2. Zannetti P. Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software. Van Nostrand Reinhold, 1990. 444 p. <https://guariso.faculty.polimi.it/AESA/Air%20Pollution%20Modeling.pdf>
3. Stockie J. M. The mathematics of atmospheric dispersion modeling. SIAM Review. 2011. Vol. 53, №. 2. P. 349–372 <https://surl.li/xdtmfu>
4. Li X., Hu X.-M., Ma Y., Wang Y., Li L.-G., Zhao Z.-Q. Impact of planetary boundary layer structure on the formation and evolution of air-pollution episodes in Shenyang, Northeast China. Atmospheric Environment. 2019. Vol. 214. 116850. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116850>
5. Pu X., Wang T. J., Huang X., Ding A. J., Zhou D. R. Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region. Science of The Total Environment. 2017. Vol. 603–604. P. 807–816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.056>
6. Методика розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств (ОНД-86), 1987. 160 с.
7. Oreto C., Russo F., Veropalumbo R., Viscione N., Biancardo S. A., Dell'Acqua G. Life Cycle Assessment of Sustainable Asphalt Pavement Solutions Involving Recycled Aggregates and Polymers. Materials. 2021. Vol. 14, № 14. 3867. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14143867>
8. Беляєв М. М., Гунько О. Ю., Ростовиков В. С. Математичне моделювання розповсюдження відпрацьованих газів автотранспорту на примігистральних територіях. *Екологічна безпека та природокористування*. 2021. Вип. 2 (38). С. 5–14.
9. Василенко Л. А., Панов Ю. Л. Екологічна безпека об'єктів дорожнього будівництва: сучасні виклики та методи оцінки. *Дороги і мости*. 2022. Вип. 25. С. 78–89.
10. Гунченко О. М. Моніторинг та моделювання стану атмосферного повітря в зонах впливу промислових підприємств. *Техногенно-екологічна безпека*. 2020. № 7. С. 44–52.
11. Інформаційний бюлетень про стан довкілля у Вінницькій області. Департамент екології та природних ресурсів Вінницької ОДА. URL: <http://www.vin.gov.ua/dep-eko>.

Дата надходження до редакції 13.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 10.01.2026.

УДК 629.113/.115; 534.836.2; 534.286; 534.322.3.699.84 DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-028-036
UDC 629.113/.115; 534.836.2; 534.286; 534.322.3.699.84

НИЗЬКОЧАСТОТНИЙ ЗВУКОПОГЛИНАЛЬНИЙ ЕКРАН

LOW-FREQUENCY SOUND-ABSORBING SCREEN



Федоров Володимир Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, Національний транспортний університету, Київ, Україна, e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-1085-5112>



Корпач Олексій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, Національний транспортний університету, Київ, Україна, e-mail: korpach1988@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-2496-4395>



Яценко Дмитро Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, Національний транспортний університету, Київ, Україна, e-mail: y_d@ukr.net,

<https://orcid.org/0000-0003-3674-0089>



Босенко Володимир Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Національний транспортний університету, Київ, Україна, e-mail: bosia4ok@ukr.net,

<https://orcid.org/0000-0002-9654-949X>

Анотація. Роль транспорту була високою у всі часи історії та практично у всіх країнах. На даний час в Україні розвинута потужна транспортна система, велику частку якої становить автомобільний транспорт. Його значимість в житті українців важко переоцінити: починаючи від індивідуальних цивільних перевезень, закінчуючи перевезеннями на фронті. Крім позитивних

факторів, автомобілі мають, на жаль, і негативні. Одним з негативних факторів автомобілів є шумове забруднення довкілля. Враховуючи той факт, що за останнє десятиліття в Україні значно зросла кількість автомобілів та щільність транспортних потоків, проблема шумового забруднення дедалі стає все більш актуальною. Особливо гострою вона є у містах. Недооцінювати негативний вплив шуму на людей не можна, оскільки він є одним із найважливіших факторів, який визначає умови роботи і відпочинку людей. При тривалій дії шум викликає необоротну втрату слуху (туговухість), шкідливо впливає на нервову систему, руйнує шлунково-кишковий тракт, згубно впливає на психіку людини, знижує гостроту зору, порушує діяльність серцево-судинної системи, знижує продуктивність праці, створює небезпеку нещасних випадків через невиразність звукових сигналів та нерозуміння усної мови. Найбільше автомобілі дошкуляють громадянам з точки зору надмірного шуму у транспортних потоках. Боротися із шумом транспортних потоків можна декількома шляхами: по-перше, знизивши рівні зовнішніх шумів кожного з автомобілів, з яких складається транспортний потік; по-друге, не розміщувати забудову близько до магістралей; по-третє, відгородити магістралі від житлових забудов шумозахисними спорудами. У даній роботі розглядається саме останній варіант, оскільки перші два вкрай важко реалізувати. Якщо шумозахисна споруда по товщині не більше півметра, її прийнято називати шумозахисний екран. В окремих випадках доцільно встановлення таких екранів між протилежними смугами автомагістралей. Це дасть додатковий акустичний ефект. Обов'язково такі шумозахисні екрани повинні мати високі звукопоглинальні властивості, з чого слідує, що виконання останніх з суцільного бетону не допустимо. Як показав досвід експериментальних досліджень транспортного шуму, необхідно звертати серйозну увагу низькочастотній складовій останнього. Особливо, якщо паралельно з автомагістраллю по місту відбувається рух швидкісного трамваю, як це реально існує на правому березі міста Києва. Для зниження низькочастотної складової необхідно нетривіальний підхід, який саме і розглядається у даній роботі.

Ключові слова: автомобільні дороги, транспортний шум, акустична ефективність, звукопоглинальний екран, шумозахисний екран, частота, звукові хвилі.

Вступ. Проблема шуму на ділянках автомобільних доріг, що проходять через населені пункти, часто не вдається вирішити за допомогою впровадження вимог до автомобілів по зовнішньому шуму останніх, певними обмеженнями руху (наприклад, забороною проїзду важких вантажних автомобілів) та ін., то чи не єдиним способом, що залишається, є впровадження шумозахисних екранів. Їх існує велике різноманіття в залежності від матеріалу виготовлення, товщини, висоти, конструктивних особливостей тощо. Необхідно захищати від транспортного шуму також водіїв та пасажирів. Для цього на роздільній смузі також необхідно встановлювати шумозахисні екрани.

Метою роботи є розробка високоефективного шумозахисного екрану, ефективність якого була б високою також і в області низьких частот.

Виклад основного матеріалу. Спочатку розглянемо відомий пристрій [1, 2] для захисту від транспортного шуму, що виконаний у вигляді стінок з отворами і козирками (рис. 1), змонтованими похило на верхніх кромках стінок, причому отвори виконані перемінного перерізу із звуженням в напрямку внутрішніх поверхонь стінок, наприклад, конічної або пірамідальної форми, їх осі – перпендикулярними до поверхонь стінок, які встановлені на спільній основі і зв'язані між собою стяжками, а козирки виконані у вигляді спільного дахоподібного перекриття. Пристрій для поглинання шуму з доріг включає (рис. 1, а) основу 1, на якій встановлено дві стінки 2 з деяким нахилом одна до

одної. З внутрішнього боку стінки 2 вкриті шумопоглинаючим шаром 3 із легкого бетону із заповнювачем з пористих вулканічних порід або іншого будівельного звукопоглинаючого матеріалу. В стінках виконані отвори 4 перемінного перерізу із звуженням в напрямку внутрішніх поверхонь стінок, наприклад, конічної (рис. 1, б) або пірамідальної (рис. 1, в) форми. Стінки зв'язані між собою стяжками 5, виконані по висоті стінок, а вгорі стінок – дві петлі 6 для можливості встановлення пристрою на транспортний засіб і на місце експлуатації. Стяжки і петлі приварюються при складанні пристрою на заводі-виробнику до раніше заформованих в стінках закладних деталей (не показані). Аналогічно кріпляться стінки з основою (не показано). Таким чином, пристрій є резонансним поглиначем: порожнина з перфорованою передньою стінкою. Від відомих резонансних поглиначів такого типу його відрізняє те, що він має двосторонню дію (приймає звукові хвилі з протилежних сторін) і може розглядатись як комплексний поглинач, що складається з двох простих. Для захисту від попадання сторонніх предметів, а також снігу і дощової води, пристрій вкритий кришкою 7 з двома петлями 8 для захоплення кришки при перевезенні та монтажі. У випадку продування снігу і дощової води через отвори 4 у внутрішню порожнину пристрою для витікання води в основі виконано кілька отворів (на рис. не позначені).

Пристрій працює наступним чином. При виникненні шуму від транспортних джерел, які переміщуються по проїжджій частині доріг, звукові хвилі безперешкодно попадають в отвори ближньої стінки, які мають велику початкову площу. Відбиваючись від стінок конічної / пірамідальної вхідної порожнини, звукові хвилі входять у внутрішню порожнину пристрою. При цьому завдяки формі вхідної порожнини (плавного зменшення поперечного перерізу у бік порожнини пристрою) практично не відбувається повернення звукової енергії назад у довкілля. В даному випадку спрацьовує ефект акустичного клину.

Недоліком пристрою для поглинання шуму з доріг [1] є:

- не висока акустична ефективність в областях середніх та високих частот;
- вкрай низька акустична ефективність в області низьких частот (НЧ).

Ці недоліки пристрою для поглинання шуму з доріг [1, 2] впливають з його конструктивних особливостей: матеріал, з якого його пропонується виробляти, має не високі звукопоглинальні властивості, особливо в області НЧ. Була поставлена задача створення такого пристрою, який мав би високу акустичну ефективність: поглинав низькочастотний транспортний шум, який практично неможливо поглинути існуючими засобами.

Поставлена задача вирішується тим, що низькочастотний звукопоглинальний екран, що містить корпус у вигляді багатьох порожнин, утворених зовнішніми стінками та перегородками, які утворюють з передніми стінками резонаторні звукопоглиначі, що мають вхідні отвори у правій стінці корпусу, в якій розташовано горловину, яка виконана у вигляді концентраційних її циліндрів, які закріплено поперемінно на правій та лівій стінках, які телескопічно входять один в другий з утворенням лабіринтового повітропроводу [3].

На рис. 2 показана схема низькочастотного звукопоглинального екрану.

На рис. 3 показана схема низькочастотного звукопоглинального екрану, вид А на рис. 2.

На рис. 4 показана схема низькочастотного звукопоглинального екрану, розріз Б-Б на рис. 2. На рис. 2 показана схема низькочастотного звукопоглинального екрану, де зображено основний вид запропонованої корисної моделі з розрізом вертикальною площиною, також надається роз'яснення, з яких основних частин вона складається: лівої стінки 1, нижньої стінки 2, верхньої стінки 3, перегородок

4 і циліндрів 5 горловин резонатора, правої стінки 6 з циліндрами 7 горловини резонатора, порожнини 8 резонатора, отвору 9, кільцевої щілини 10.

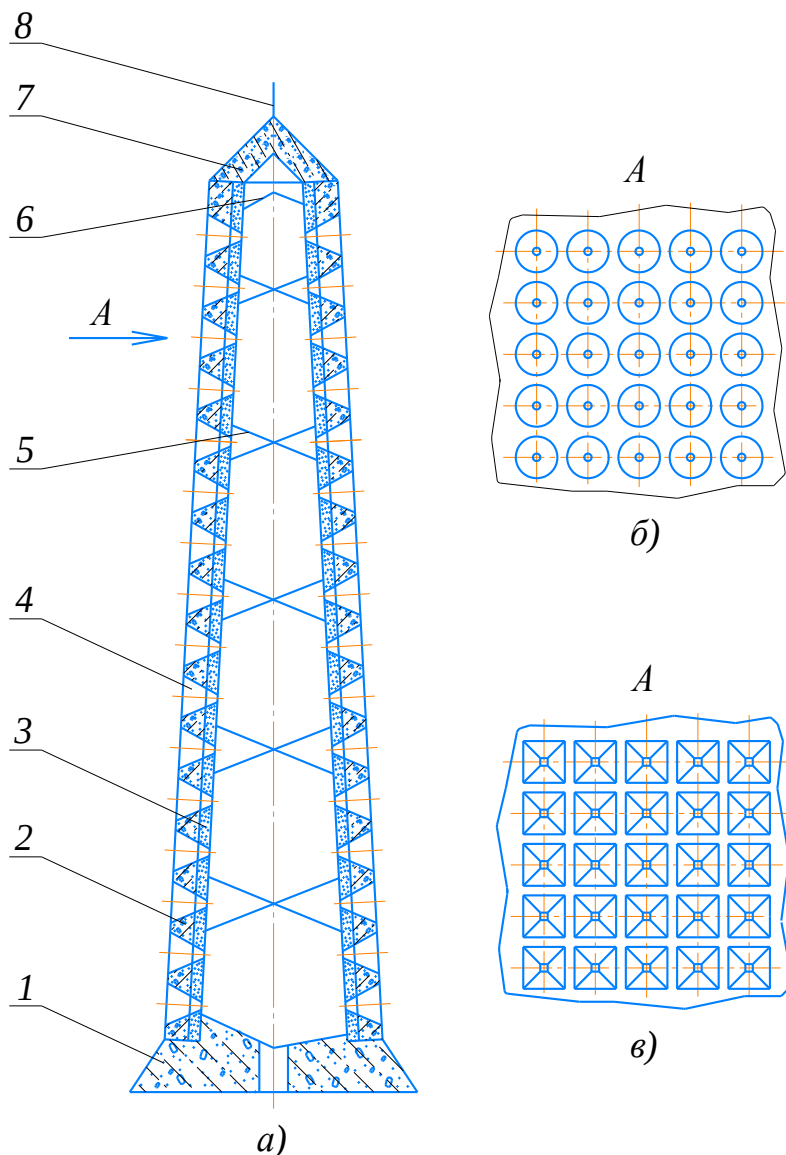


Рисунок 1 – Пристрій для захисту від шуму:

а – головний вид (вертикальний розріз); б – варіант: отвори у вигляді конусів; в – варіант: отвори у вигляді пірамід; 1 – основа; 2 – стінки; 3 – шумопоглинальний шар; 4 – отвори; 5 – стяжки; 6 – петлі; 7 – кришка; 8 – петлі для захоплення кришки при перевезенні та монтажі

Figure 1 – Noise protection device:

a – main view (vertical section); b – option: holes in the form of cones; c – option: holes in the form of pyramids; 1 – base; 2 – walls; 3 – noise-absorbing layer; 4 – holes; 5 – ties; 6 – hinges; 7 – cover; 8 – hinges for holding the cover during transportation and installation

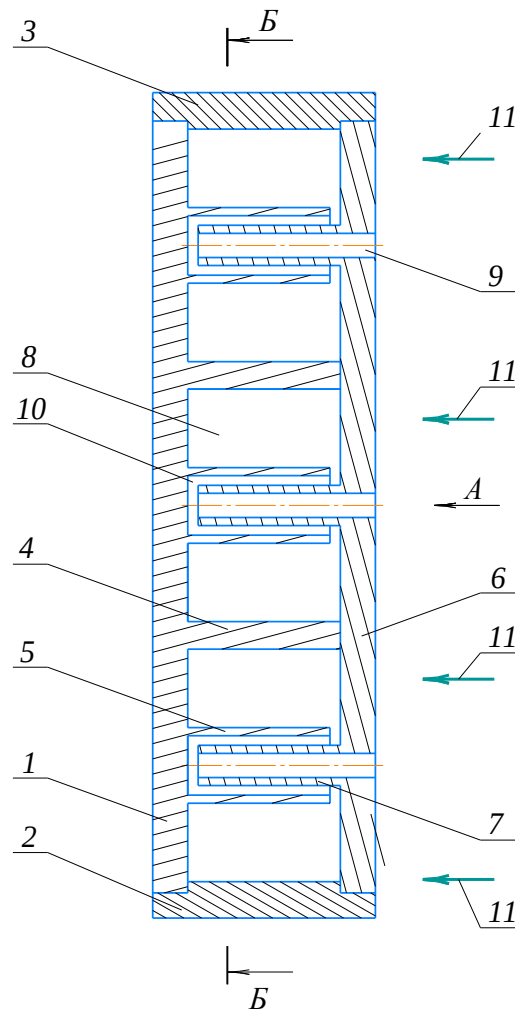


Рисунок 2 – Схема низькочастотного звукопоглинального екрану:

1 – ліва стінка; 2 – нижня стінка; 3 – верхня стінка; 4 – перегородки; 5, 7 – циліндри горловин резонатора; 6 – права стінка; 8 – резонатор; 9 – отвір; 10 – кільцева щілина; 11 – звукові хвилі (шум)

Figure 2 – Scheme of a low-frequency sound-absorbing screen:

1 – left wall; 2 – lower wall; 3 – upper wall; 4 – partitions; 5, 7 – cylinders of the resonator necks; 6 – right wall; 8 – resonator; 9 – hole; 10 – annular gap; 11 – sound waves (noise)

На рис. 3 показана схема низькочастотного звукопоглинального екрану, де зображено вид А запропонованої корисної моделі на рис. 1, також надається роз'яснення, з яких основних частин вона складається: нижньої стінки 2, верхньої стінки 3, циліндрів 5 горловин резонатора, правої стінки 6 з циліндрами 7 горловини резонатора, отвору 9.

На рис. 4 показана схема низькочастотного звукопоглинального екрану, зображено розріз Б-Б запропонованої корисної моделі на рис. 1, також надається роз'яснення, з яких основних частин вона складається: лівої стінки 1, нижньої стінки 2, верхньої стінки 3, перегородок 4 і циліндрів 5 горловин резонатора, циліндрів 7 горловини резонатора, отвору 9.

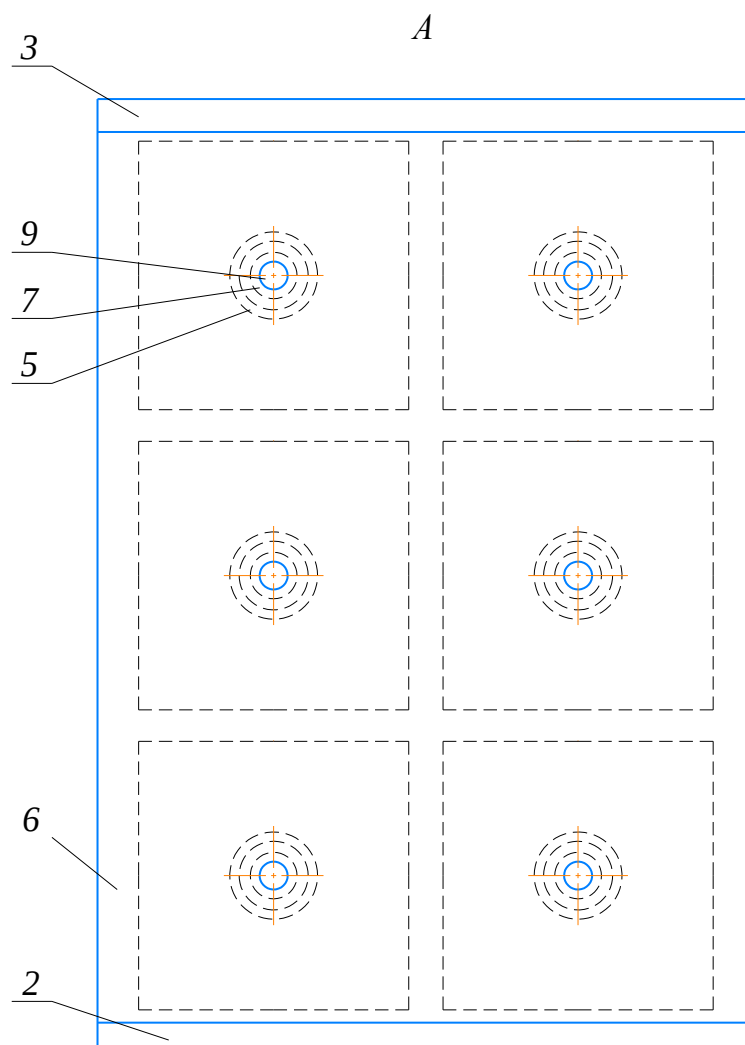


Рисунок 3 – Схема низькочастотного звукопоглинального екрану (вид А на рис. 2):

2 – нижня стінка; 3 – верхня стінка; 5, 7 – циліндри горловин резонатора; 6 – права стінка; 9 – отвір

Figure 3 – Scheme of a low-frequency sound-absorbing screen (view A in Fig. 2):

2 – lower wall; 3 – upper wall; 5, 7 – cylinders of the resonator necks; 6 – right wall; 9 – hole

Низькочастотний звукопоглинальний екран складається із корпусу у вигляді багатьох порожнин, утворених лівою стінкою 1, нижньою стінкою 2, верхньою стінкою 3, перегородками 4 і циліндрами 5 горловини резонатора, а також правої стінки 6 з циліндрами 7 горловини резонатора. Стінки 1 і 6, а також перегородки 4 і циліндри 5 утворюють резонаторну камеру 8. Отвір 9 циліндра 7, щілина між торцем циліндра 7 і лівою стінкою 1, кільцева щілина 10 між циліндрами 5 і 7 та щілина між торцем циліндра 5 і правою стінкою 6 утворюють горловину резонатора.

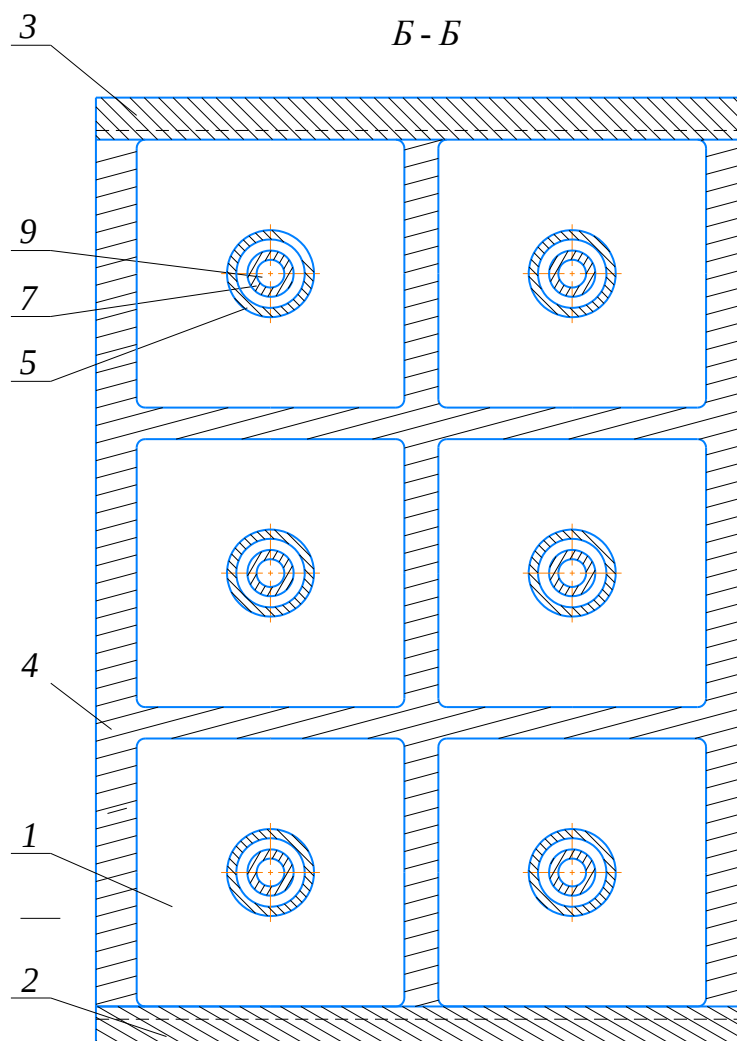


Рисунок 4 – Схема низькочастотного звукопоглинального екрану (вид Б на рис. 2):

1 – ліва стінка; 2 – нижня стінка; 3 – верхня стінка; 5, 7 – циліндри горловин резонатора; 6 – права стінка; 9 – отвір

Figure 4 – Scheme of a low-frequency sound-absorbing screen (view B in Fig. 2):

1 – left wall; 2 – lower wall; 3 – upper wall; 5, 7 – cylinders of the resonator necks; 6 – right wall; 9 – hole

Низькочастотний звукопоглинальний екран працює наступним чином.

Низькочастотний звукопоглинальний екран містить корпус у вигляді багатьох порожнин. Звукові хвилі (шум) падають на праву стінку 6 низькочастотного звукопоглинального екрану і їх низькочастотна складова високоефективно поглинається кожною резонаторним глушником шуму. Резонаторний глушник є елементарною коливальною системою із затуханням, яка, будучи збуджена звуковою хвилею, що падає на неї, відбирає від цієї хвилі акустичну енергію на частотах, близьких до власної частоти резонатора. Максимальне поглинання енергії для одиночного резонатора буде

спостерігатися на резонансній частоті, яка прямопропорційна швидкості звуку в середовищі та обернено пропорційна квадратному кореню об'єму резонаторної камери та довжина горловини резонатора [2].

Як випливає з формули (1), чим більше довжина горловини резонатора, тим нижче частота резонансу останнього. У корисній моделі запропоновано горловину у формі лабіринту, що робить довжину останньої великою (а значить низькою частоту резонансу), при цьому ширина екрану не збільшується, що дає останньому конструктивні переваги. Велика кількість порожнин (резонаторних глушників) створює високу акустичну ефективність низькочастотного звукопоглинального екрану.

Запропонований низькочастотний звукопоглинальний екран має всі ознаки дієздатності, оскільки фізичні процеси, які в ньому відбуваються, абсолютно ідентичні тим, що описані в [1, 2]. Конструктивні особливості, які відрізняють запропонований екран від того пристрою для поглинання шуму з доріг, що описаний в [1, 2], не можуть вплинути на його працездатність.

Висновки. Розроблено низькочастотний звукопоглинальний екран, відмінною особливістю якого є використання групи резонаторних глушників типу резонатора Гельмгольца. Причому, для пониження резонаторної частоти останніх запропоновано монтувати горловину у вигляді телескопічного стакана. Також для зручності використання пропонується використання даної горловини всередині порожнини резонатора. Такі пропозиції забезпечать крім високої акустичної ефективності запропонованого низькочастотного звукопоглинального екрану на низьких частотах, велику довговічність останньому.

Перелік посилань

1. Патент на корисну модель № 82377 UA, МПК (2006) G10K 11/00. Пристрій для поглинання шуму з доріг / В. В. Федоров, В. П. Сахно ; заявник і патентовласник Національний транспортний університет. № u200601198 ; заявл. 07.02.2006 ; опубл. 10.04.2008, Бюл. № 7.
2. Федоров В. В. *Акустика автомобіля* : монографія. Київ : Принт, 2008. 285 с.
3. Патент на корисну модель № 161609 UA, МПК (2025.01) E01F 8/00. Низькочастотний звукопоглинальний екран / В. В. Федоров, О. А. Корпач, Д. М. Яценко, В. М. Босенко ; заявник і патентовласник Національний транспортний університет. № u202503142 ; заявл. 30.06.2025 ; опубл. 17.12.2025, Бюл. № 51.

LOW-FREQUENCY SOUND-ABSORBING SCREEN

Volodymyr Fedorov, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of the Automobile Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com, tel.+380442804252, <https://orcid.org/0000-0002-1085-5112>.

Oleksii Korpach, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of the Automobile Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: korpach1988@gmail.com, tel.+380442804252, <https://orcid.org/0000-0002-2496-4395>.

Dmytro Yashchenko, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of the Automobile Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: y_d@ukr.net, tel.+380442804252, <https://orcid.org/0000-0003-3674-0089>.

Volodymyr Bosenko, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor of the Automobile Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: bosia4ok@ukr.net, tel.+380442804252, <https://orcid.org/0000-0002-9654-949X>.

Summary. The role of transport has been high at all times of history and in almost all countries. Currently, Ukraine has a developed powerful transport system, a large share of which is road transport. Its importance in the lives of Ukrainians is difficult to overestimate: from individual civilian transportation to transportation at the front. In addition to positive factors, cars have, unfortunately, negative ones. One of the negative factors of cars is environmental noise pollution. Given the fact that over the past decade in Ukraine the number of cars and the density of traffic flows have significantly increased, the problem of noise pollution is becoming increasingly relevant. It is especially acute in cities. The negative impact of noise on people cannot be underestimated, since it is one of the most important factors that determines the conditions of work and recreation of people. With prolonged exposure, noise causes irreversible hearing loss (hearing loss), has a harmful effect on the nervous system, destroys the gastrointestinal tract, has a detrimental effect on the human psyche, reduces visual acuity, disrupts the cardiovascular system, reduces labor productivity, and creates a risk of accidents due to the indistinctness of sound signals and misunderstanding of spoken language. Cars annoy citizens the most in terms of excessive noise in traffic flows. There are several ways to combat traffic noise: first, by reducing the external noise levels of each of the cars that make up the traffic flow; second, not to place buildings close to highways; third, to fence off highways from residential buildings with noise-protection structures. This paper considers the latter option, since the first two are extremely difficult to implement. If the noise-protection structure is no more than half a meter thick, it is usually called a noise-protection screen. In some cases, it is advisable to install such screens between opposite lanes of highways. This will give an additional acoustic effect. Such noise protection screens must necessarily have high sound-absorbing properties, which means that the latter cannot be made of solid concrete. As the experience of experimental studies of transport noise has shown, it is necessary to pay serious attention to the low-frequency component of the latter. Especially if a high-speed tram runs parallel to the highway in the city, as it actually does on the right bank of the city of Kyiv. To reduce the low-frequency component, a non-trivial approach is required, which is what is considered in this work.

Keywords: highways, traffic noise, acoustic efficiency, sound-absorbing screen, noise protection screen, frequency, sound waves.

References

1. Fedorov, V.V. (2008). Prystriy dlya pohlynannya shumu z dorih [Road noise absorption device]. Patent No. 82377, bulletin "Industrial Property" No. 7. [In Ukrainian].
2. Fedorov V.V. (2008). *Akustyka avtomobilya* : Prynt [Car acoustics : Print]. Kyiv, 285. [In Ukrainian].
3. Fedorov, V.V., Korpach, O.A., Yashchenko, D.M., Bosenko, V.M. (2025). Nyz'kochastotnyy zvukopohlynal'nyy ekran [Low-frequency sound-absorbing screen]. Patent No. 161609, bulletin "Industrial Property" No. 51. [In Ukrainian].

*Дата надходження до редакції 10.01.2026.
Дата прийняття статті після рецензування 05.02.2026.*

УДК 656.13
UDC 656.13

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-037-049

**РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ КУЗОВНИХ
ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ПРИ ЗІТКНЕННІ**

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING PLASTIC DEFORMATIONS
OF VEHICLE BODY PARTS DURING COLLISION**



***Драгобецький Володимир Вячеславович**, доктор технічних наук,
професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, м. Кременчук, Україна, kafedra.tehmash@gmail.com.*

<http://orcid.org/0000-0001-9637-3079>



***Мороз Микола Миколайович**, доктор технічних наук, професор,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, м. Кременчук, Україна, mykolai.moroz@gmail.com*

<http://orcid.org/0000-0001-6107-1230>



***Молоштан Дмитро Васильович**, кандидат технічних наук, доцент,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, м. Кременчук, Україна, moloshtandima@gmail.com*

<http://orcid.org/0000-0001-8881-8541>



***Черниш Андрій Анатолійович**, кандидат технічних наук, доцент,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, м. Кременчук, Україна, chernyshkrnu@gmail.com*

<http://orcid.org/0000-0002-9711-827X>



***Нікітіна Альона Вікторівна**, кандидат технічних наук, доцент,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, м. Кременчук, Україна, nikaalyonka@gmail.com*

<http://orcid.org/0000-0003-0495-0604>

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності автотехнічної експертизи дорожньо-транспортних пригод, яка безпосередньо впливає на об'єктивність встановлення обставин зіткнень та визначення швидкісних параметрів транспортних засобів. Існуючі методи оцінки пластичних деформацій кузовних деталей переважно базуються на статичних підходах, що не враховують динамічну природу ударних навантажень та інерційні властивості матеріалів у момент зіткнення. Це призводить до значних похибок у визначенні енергетичних параметрів удару та реконструкції механізму дорожньо-транспортних пригод.

Метою дослідження є удосконалення методу математичного опису процесів деформації та руйнування конструктивних елементів транспортних засобів, які виникають внаслідок ударних навантажень під час зіткнень. Робота спрямована на підвищення точності та об'єктивності автотехнічної експертизи шляхом уточнення підходів до визначення пластичних деформацій облицювальних деталей автомобілів, враховуючи сучасні вимоги до безпеки дорожнього руху та необхідність точного відтворення механізму ДТП.

Об'єкт дослідження – процес управління проєктами громадської участі.

Предмет дослідження – закономірності пластичного деформування кузовних деталей автомобілів з урахуванням динамічних характеристик матеріалів, інерційних властивостей та енергетичного балансу системи в умовах зіткнення.

Методика дослідження. У дослідженні використано комплексний підхід, що базується на феноменологічній теорії, методах механіки деформівного твердого тіла та теорії пластичності. Для математичного моделювання поведінки матеріалів при динамічному навантаженні застосовано аналітичні методи Ритца та рівняння Лагранжа другого роду. Методика включає аналіз енергетичного балансу системи, де враховується робота зовнішніх сил, інтенсивність напружень, ступінь деформації та об'єм матеріалу. Експериментальна частина базується на проведенні ударних випробувань (згинання, розтягування, стиснення) для вивчення механічних характеристик металів у динамічному режимі, зокрема із застосуванням методу пружного відскоку для визначення твердості деформованого металу. Також проведено класифікацію облицювальних деталей за типом їхньої кривизни та контуру (елементи одинарної та подвійної кривизни, замкнуті та незамкнуті контури).

Ключові слова: автотехнічна експертиза, руйнування, деформація, феноменологічна теорія, твердість, транспортні засоби, безпека дорожнього руху.

Вступ. Сучасний розвиток транспортної галузі супроводжується стрімким зростанням кількості автомобілів, що призводить до підвищення інтенсивності дорожнього руху. Незважаючи на досягнення в галузі транспортного машинобудування, збільшення динамічних характеристик транспортних засобів та недостатні темпи розвитку дорожньої інфраструктури спричиняють зростання кількості дорожньо-транспортних пригод (ДТП). ДТП мають суттєвий вплив на соціальну, економічну та екологічну сфери, вимагаючи точного та об'єктивного встановлення причин і механізму зіткнень. У цьому контексті особливої актуальності набуває розвиток ефективних методів автотехнічної експертизи, зокрема, уточнення і вдосконалення підходів до визначення пластичних деформацій облицювальних деталей автомобілів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сфері автотехнічної експертизи значна увага приділяється розробці та вдосконаленню методів визначення швидкості руху транспортних засобів на момент зіткнення. Найпоширенішими залишаються методи, що базуються на визначенні швидкості за довжиною гальмівного шляху та уповільненням під час гальмування. У той же час, для більш точного відтворення умов ДТП дослідники, зокрема В. А. Огородніков [1–6], пропонують використовувати моделі, що враховують повний енергетичний баланс системи. Розвиток методів ідентифікації пошкоджень спрямований на впровадження експериментально-розрахункових способів, зокрема, через вимірювання твердості пошкодженого металу з подальшим розрахунком роботи деформації. У сучасних дослідженнях обґрунтовано доцільність застосування ударних випробувань (згинання, розтягування) для уточнення фізико-механічних характеристик матеріалів у динамічному режимі. На

їх основі пропонується будувати діаграми деформацій та тарировочні графіки, які відображають реальні умови пошкоджень при ДТП.

Постановка завдання. У межах дослідження поставлено мету – удосконалити метод математичного опису процесів деформації та руйнування конструктивних елементів транспортних засобів під дією ударних навантажень. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи визначення параметрів деформації та швидкості транспортних засобів під час зіткнення, виявити їхні обмеження щодо врахування динаміки ударного процесу.

2. Розробити модель, яка враховує кінетичну енергію, витрачену на пластичну деформацію, а також інерційні та релаксаційні властивості матеріалів.

3. Вивчити механічні характеристики металів у динамічному режимі шляхом ударних випробувань (згинання, розтягування), зокрема з використанням методу пружного відскоку.

4. Удосконалити підходи до ідентифікації характеру пошкоджень транспортних засобів для більш точного відтворення механізму аварії в рамках автотехнічної експертизи.

Виклад основного матеріалу. Переважна більшість облицювальних елементів кузова автомобіля, що підлягають діагностиці, представлена деталями без бортів, які мають плоску або криволінійну поверхню з незамкнутим контуром. Вони поділяються на елементи одинарної та подвійної кривизни. Деталі одинарної кривизни, своєю чергою, класифікуються як з однозначною, так і з двозначною кривиною, подібний розподіл застосовується й до деталей подвійної кривизни. До найбільш вразливих у разі дорожньо-транспортних пригод належать компоненти паливної системи, зокрема глушники, резонатори, трубопроводи та патрубки. Ці елементи, як правило, мають замкнутий контур і характеризуються одинарною або подвійною кривизною, із можливістю однозначного чи двозначного профілю кривизни. Місцеві зони стоншення матеріалу у вм'ятинах різної форми, як правило, спостерігаються в центральній частині вм'ятини – полюсі, і залежать від взаємозв'язку між внутрішнім тиском і кривизною в цьому місці при настанні втрати стійкості конструкції. Використання методів пластичної теорії деформації для аналізу оболонок різної кривизни дозволяє обчислити граничні значення прогину та радіуса в області полюса деформації. Для низьковуглецевих сталей типу «автомат» із товщиною 0,8 мм встановлено граничне співвідношення між шириною вм'ятини та її прогином, яке дорівнює 3,10.

Однією з головних причин значної кількості аварій є виїзд на смугу зустрічного руху та перевищення допустимої швидкості. У випадках зіткнень за підвищених швидкостей участь кількох транспортних засобів ускладнює процес автотехнічного дослідження. Існують усталені методики розрахунку енергії удару й визначення швидкості зіткнення, яка спричинила пластичну деформацію конструктивних елементів автомобіля. В основі таких методів лежить поняття енергетично еквівалентної швидкості.

Один із сучасних підходів до оцінювання швидкості транспортного засобу полягає у встановленні функціонального зв'язку між величиною енергії, витраченої на пластичну деформацію, і зміною твердості металу в зоні деформації. Альтернативний підхід базується на порівнянні механічних характеристик матеріалу в деформованому та недеформованому стані.

У вітчизняній та зарубіжній літературі найчастіше приймають апроксимуючу залежність динамічної межі плинності від швидкості деформації у вигляді

$$\sigma_{sd} = \sigma_s \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/n} \right]. \quad (1)$$

де σ_{sd} – напруги динамічної межі плинності;

σ_s – напруги статичної межі плинності;

D, n – постійні величини.

Під час зіткнення транспортних засобів енергетичний баланс системи, утвореної автомобілями, що беруть участь у зіткненні, розглядається на трьох етапах: на момент початку зіткнення, у фазі його завершення, а також протягом періоду відкидання автомобілів після удару.

$$0,5 \sum_{i=1}^n m_i V_i^2 = \sum_{i=1}^n W_{ri} + \sum_{i=1}^n A d_i ,$$

де n – кількість автомобілів, що зіткнулися;

m_i – маси автомобілів;

V_i – швидкості автомобілів на момент зіткнення;

W_{ri} – робота сил опору переміщенням автомобілів;

$A d_i$ – робота деформацій та руйнування деталей та конструкцій автомобілів.

Сила тертя дорівнює сумі двох складових $T = T_m + T_d$.

Сучасні методи оцінювання енергії деформації та руйнування, що виникають унаслідок зіткнення, ґрунтуються на обчисленні роботи, затраченої на деформування пошкоджених конструктивних елементів. Це значення визначається відповідно до встановлених залежностей [7, 8]:

$$\delta A = \iiint_V (\sigma_n d l_n) dV + \delta A_d \quad (2)$$

де A – робота зовнішніх сил;

σ_n – інтенсивність напружень;

l_n – ступінь деформацій;

V – об'єм матеріалу;

A_d – робота руйнування.

Пошкоджені елементи конструкції при швидкостях понад 50 м/с зазнають деформування, яке супроводжується локалізацією пластичних деформацій в окремих зонах. У таких умовах кінетична енергія, що накопичується в процесі швидкісного деформування, безпосередньо перетворюється у роботу пластичного деформування в місці її концентрації. Під час зіткнення транспортних засобів їх швидкість змінюється з часом, що призводить до виникнення інерційних сил першого порядку. У результаті цього рівняння, що описує напружено-деформований стан, набуває модифікованої форми.

$$\sigma_{11} = (\sigma + 2\mu \varepsilon_n) \left[0,5 + \sqrt{0,25 + \frac{2\mu \dot{\varepsilon}_{11}^2 \left(\dot{\varepsilon}_{11} \varepsilon_{11} + \frac{\partial \dot{\varepsilon}_{11}}{\partial t} \right)}{(\sigma + 2\mu \varepsilon_n)^2}} \right]; \quad (3)$$

$$\text{де } \sigma = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}; \mu = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i}.$$



Рисунок 1 – Пошкодження транспортних засобів
Figure 1 – Damage to vehicles

Розглянемо круглу вм'ятину як тонкостінну, жорстко зафіксовану по краю. Проаналізуємо розв'язання задачі за двох варіантів граничних умов.

1. У початковий момент задана кінетична енергія вм'ятини T_0 .
2. На поверхні вм'ятини заданий тиск $p = p(r, t)$, де r – координата, а t – час, в окремому випадку $p = p(t)$.

Відомо, що взаємодія ударної хвилі з вм'ятиною обмежених розмірів має складну природу. Так, при відображенні ударної хвилі від защемленої вм'ятини характер зміни тиску $p(r, t)$ на вм'ятині залежить від міцності, щільності, товщини та радіусу вм'ятини (рис. 2).

Для повного розв'язання цієї задачі у випадку розташування заряду вибухової речовини на осі симетрії необхідне чисельне інтегрування рівнянь розльоту продуктів детонації, динаміки середовища та поведінки вм'ятини під час її взаємодії з оточенням. При цьому слід враховувати як газодинамічні рівняння, так і співвідношення, що описують міцнісні властивості перешкоди. Такий підхід є досить складним і ресурсомістким.

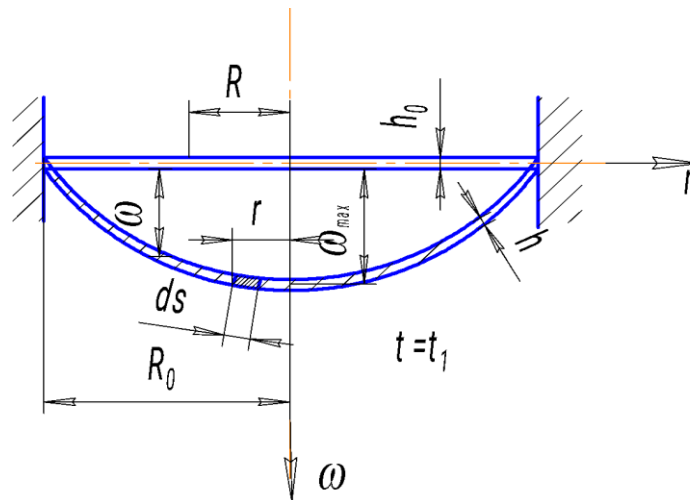


Рисунок 2 – Модель деформування круглої вм'ятини

Джерело: розроблено авторами

Figure 2 – Deformation model of a circular dent

Source: developed by the authors

Отже, похідні $\frac{\partial B}{\partial A}$, $\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial A}$ і $\partial \sqrt{1 + \frac{(A\dot{\phi})^2}{\partial A}}$, які визначають функцію $\frac{\partial E_\phi}{\partial A}$, обчислюються за допомогою виразів. Це завдання може бути вирішено за допомогою рівняння Лагранжа 2-го роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{A}} + \frac{\partial (E_\phi - T)}{\partial A} = 0.$$

Найпростіше рішення у даному випадку виходить, якщо задана початкова кінетична енергія вм'ятини T_0 .

Розглянемо випадок, коли на поверхні пластини задано тиск $p = p(r, t)$, в окремому випадку може бути $p = p(t)$. Нехтуємо кінетичною енергією $T_u \ll T_\omega$, тому рівняння Лагранжа можна записати у вигляді

$$-\iiint \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} \delta \omega p dv - \delta E_\phi + \iint_F p \delta \omega dF = 0. \quad (4)$$

Звідси можна визначити

$$B_1 = B_1(B_2, B_3, \dots, B_n, A_1, A_2, \dots, A_n). \quad (5)$$

Коефіцієнти $B_2, B_3, \dots, B_n$ визначаються за умови, що з даної форми вм'ятини, т. к. е. фіксоване A_i значення E_ϕ має бути мінімальним. Звідси

$$\frac{\partial E_\phi}{\partial B_i} = 0, \quad (6)$$

де $i = 2, 3, \dots, n$. Коефіцієнти A_i визначаються з рівнянь (2.72) за умови, що $h = \sum B_i \varphi_i$.

Запишемо рівняння Лагранжа для цього випадку:

$$-\frac{\partial E_\phi}{\partial \Phi} - \int_0^{K_0} \ddot{A} \varphi^2 \rho dv + \int_0^{R_0} p dF = 0,$$

$$dF = 2\pi r \sqrt{1 + (A\varphi)^2} dr.$$

Це є типовим диференціальним рівнянням другого порядку.

Руйнування в центрі настає при досягненні $\varepsilon_h = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$ певного значення $\varepsilon_h = \varepsilon_{hp}$. Величина

ε_{hp} визначається з досвіду при руйнуванні защемленої вм'ятини.

На завершення наведемо приклад розрахунку за наведеною вище аналітичною методикою, що описує закон руху круглої вм'ятини, защемленої по контуру, з урахуванням зміни товщини матеріалу під час динамічного пластичного деформування. Механічні характеристики матеріалу вм'ятини приймемо рівними: $\sigma_s = 30,4$ кг/мм², $D = 46$ кг/мм².

Розміри вм'ятини: $R_0 = 76$ мм, $h_0 = 1,2$ мм, початкова кінетична енергія вм'ятини $T = \frac{mV_0^2}{2} = 180$ кГм. Її величина дорівнює після закінчення деформування вм'ятини $T_0 = E_\phi$. У процесі деформування вм'ятини повинен дотримуватися закон збереження енергії $T_0 = E_{\phi i} + T_i = \text{const}$, де $E_{\phi i}$ і T_i – енергія формозміни та кінетична енергія вм'ятини в момент часу t_i . Величини $E_{\phi i}$ і T_i визначаються за допомогою рівнянь (2.29) та (2.24):

$$E_{\phi i} = \sigma_{se} \int_0^{R_0} \varepsilon_i 2\pi r h \sqrt{1 + \left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2} dr + \frac{D}{2} \int_0^{R_0} \varepsilon_i^2 2\pi r h \sqrt{1 + \left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2} dr, \quad (7)$$

$$T_i = \left(\frac{dA}{dt}\right)^2 \int_0^{R_0} \pi \rho h \sqrt{1 + \left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2} \left[1 - \left(\frac{r}{R_0}\right)^2\right]^{2m} dr. \quad (8)$$

В процесі цих розрахунків визначаються для кожного A_i розподілу деформацій $\varepsilon_h, \varepsilon_\phi, \varepsilon_i$ у різних точках вм'ятини для даного моменту часу t_i . На рис. 3 представлено розподіл ε_i для різних прогинів A_i .

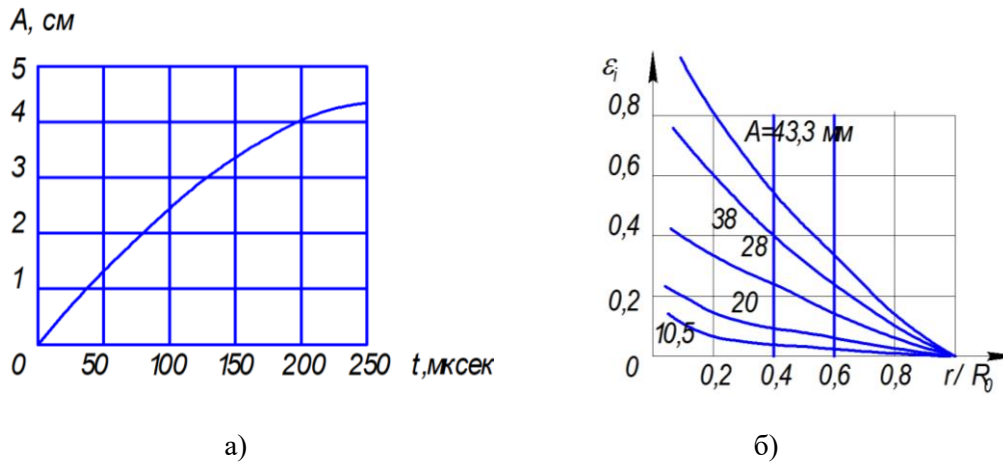


Рисунок 3 – Динамічні характеристики круглої вм'ятини: а) рівняння руху вм'ятини;
 б) зв'язок між радіусом та прогином
 Джерело: розроблено авторами

Figure 3 – Dynamic characteristics of a circular dent: a) equation of motion of the dent;
 b) relationship between radius and deflection
 Source: developed by the authors

Дана методика в деяких випадках може застосовуватися для приблизного аналізу мембранних датчиків, які фіксують вибухові хвилі у повітрі, воді або ґрунті, особливо коли час взаємодії мембрани із середовищем t_θ , протягом якого передається основна частина енергії із середовища в мембрану, мало в порівнянні з часом деформування перешкоди t_∂ .

Спотворення цих ліній після досвіду дозволяє визначити кінцеві деформації $\varepsilon_r, \varepsilon_h$ в кожній точці мембрани і, отже, обчислити величину енергії формозміни. За прийнятих припущень

$$E_\phi = T_0 = \frac{MV_0^2}{2} = I_0 M, \text{ де } I_0 = K i_n S, \text{ якщо } R_q \gg R_0, \text{ и } I_0 = K \int_0^{R_0} i_n(R) ds, \text{ якщо } R \text{ порівняно з}$$

R_0 ; S – площа мембрани, M – маса мембрани, K – середній інтегральний коефіцієнт відображення,

$$K = \frac{I_0}{I_n}.$$

Величина відбитого питомого імпульсу дорівнює $i_0 = \int_0^{t_0} p_0(t) dt$. Тиск на перешкоді $p_0(t)$ може

мати складний характер. Так, наприклад, при взаємодії вибухової хвилі у воді з перешкодою спочатку йде процес відбиття ударної хвилі, і у разі тонкої перешкоди за дуже короткий час $t=0$ (постійна часу) пластина розганяється до такої швидкості, що у воді виникають негативні напруження, які можуть призвести до розриву у рідині біля пластини.

При зіткненні транспортних засобів рівняння руху матеріалу вм'ятини сферичної форми має вигляд:

$$\rho \frac{du}{dt} - \frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{(\sigma_\phi - \sigma_r)}{r} = \frac{p_0}{\delta} S, \quad (9)$$

де ρ – щільність деформованого матеріалу;

u – швидкість матеріалу вм'ятини;

σ_r, σ_ϕ – радіальні та осьові напруження;

p_0 – тиск;

δ – товщина матеріалу облицювальної деталі транспортного засобу.

Пластини прямокутної форми широко використовуються в різних інженерних конструкціях, таких як капоти, двері, передні та задні крила автомобілів, елементи крила літаків, днища, палуби та бортові стінки суден, а також стінки суцільнометалевих вагонів тощо. Найчастіше вони виконують функцію обшивки, яка з'єднується з підкріплювальними ребрами жорсткості, утворюючи єдину конструктивну систему.

У таких конструкціях обшивка зазнає впливу локалізованих поперечних навантажень, наприклад, аеродинамічного тиску, а також бере участь у сприйманні основних силових впливів, що діють на всю конструкцію, зокрема від загального вигину або стиску листової частини. У багатьох випадках домінують саме основні зусилля, що спричиняють стискання, згин або зсув у площині пластини. За певних умов це може викликати втрату стійкості, що проявляється у вигляді витріщання або викривлення пластини (див. рис. 4).

У зв'язку з цим, розрахунок стійкості пластин є важливим етапом загального аналізу міцності та надійності всієї конструкції.

При визначенні критичних навантажень, коли розглядаються рівноважні стани, близькі до початкового, можна вважати, що напруження в серединній площині пластини, що виникають під час витріщання, є незначними порівняно з напруженнями вигину; також прогини пластини вважаються малими відносно її товщини. В окремих випадках допустиме застосування теорії жорстких пластин, яка нехтує напруженнями в серединній площині. Проте для аналізу поведінки пластини після досягнення критичного навантаження слід користуватися більш загальною теорією гнучких пластин, яка одночасно враховує напруження як у серединній площині, так і вигину.

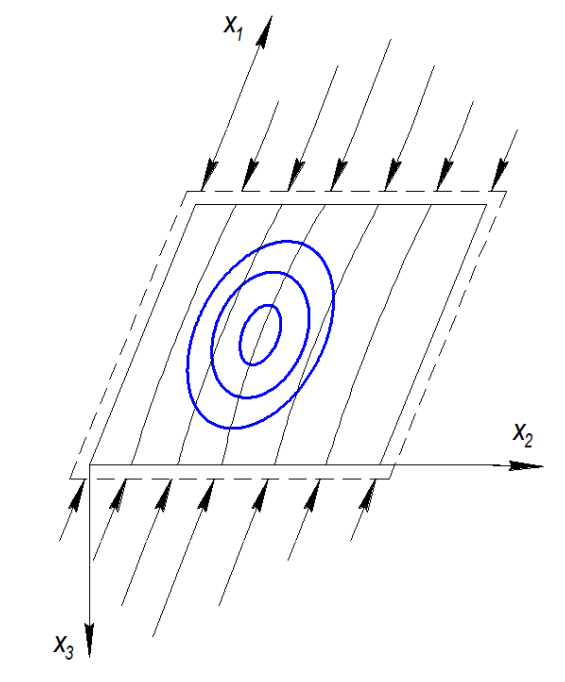


Рисунок 4 – Виступання частин конструкції автомобіля під впливом стиску, вигину та зсуву

Джерело: розроблено авторами

Figure 4 – Protrusion of vehicle structural parts under compression, bending and shear

Source: developed by the authors

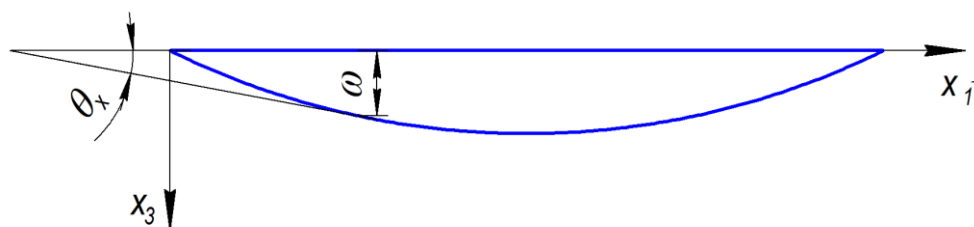


Рисунок 5 – Перетин зігнутої поверхні платівки

Джерело: розроблено авторами

Figure 5 – Cross-section of a curved surface of a plate

Source: developed by the authors

Координатна площина x_1x_2 збігається із серединною площиною пластинки; вісь x_1 будемо, як правило, проводитимемо вздовж довгої сторони, вісь x_2 – вздовж короткої сторони. Позначимо переміщення точок серединної поверхні вздовж осей x_1, x_2, x_3 через u, v, w .

Висновки. 1. Виявлено, що при визначенні умов і відновленні подій ДТП з використанням рівнянь і методів теорії пластичності необхідно враховувати вплив масових сил. Це змінює значення інваріантів тензора напружень і показника напруженого стану. Крім того, у фізичному законі вводиться залежність від швидкості деформацій.

2. Для визначення механічних властивостей матеріалів під час динамічних навантажень у ДТП доцільно застосовувати методи ударних випробувань на розтягування, стиснення та згинання, що дозволяє підвищити точність оцінки параметрів автомобілів у 1,5–1,6 раза.

3. Аналітично доведено необхідність врахування в часі не лише енергії деформації внутрішніх напружень, а й кінетичної енергії деформованих елементів конструкції. На початкових етапах зіткнення кінетична енергія пошкоджених елементів перевищує енергію деформації внутрішніх напружень у десятки разів.

Перелік посилань

1. Огородніков В. А., Сердюк В. Ф. Відновлення деталей машин методом пластичної формозміни. *Вісник ВПІ*. 1996. № 3. С. 58–62.

2. Огородніков В. А., Архіпова Т. Ф. Енергія деформації транспортних засобів в умовах дорожньо-транспортних пригод. *Наукові праці ВНТУ*. 2020. № 3. URL: <https://ntp.vntu.edu.ua/index.php/ntp/article/view/1234> (якщо це онлайн-видання, варто додати посилання).

3. Патент на корисну модель № 66462 А Україна, МПК6 G01N 19/00, G01N 33/20. Спосіб визначення швидкості транспортних засобів у момент зіткнення / Огородніков В. А. ; заявник і патентовласник Огородніков В. А. № 2003043308 ; заявл. 14.04.2003 ; опубл. 17.05.2004, Бюл. № 5.

4. Ogorodnikov V. A. The Physical Model of Motor Vehicle Destruction under Shock Loading for Analysis of Road Traffic Accident. *Proc. SPIE 10808. Photonics Application in Astronomy, Communications Industry and High-Energy Physics Experiments*. 2018. 186 p.

5. Макієнко О. М., Єщенко О. Д., Драгобецький В. В. Визначення показника напруженого стану заготовки при штампуванні вибухом по екстремальним значенням нормальних напружень. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства* : матеріали XXXI Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (Кременчук, 2024 р.). Кременчук : КрНУ, 2024. С. 113–115.

6. Огородніков В. А., Музичук В. І., Нахайчук О. В. Механіка процесів холодного формозмінення з однотипними схемами механізму деформації : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. 179 с.

7. Стеблюк В. І., Орлюк М. В., Холявік О. В. Визначення параметрів напружено-деформованого стану при витягуванні коробчастих деталей із заготовок, розрахованих методом потенціалу. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. 2012. № 46 (952). С. 98–101.

8. Драгобецький В. В. Розробка комбінованих методів вибухової металообробки як один з напрямків удосконалення деталей машин і агрегатів. *Наукові нотатки : міжвузівський збірник*. Луцьк, 2001. Вип. 9. С. 139–145.

9. Нахайчук О. В., Огородніков В. А., Музичук В. І., Деревенько І. А. Діагностування матеріалів для технічних експертиз і процесів обробки металів тиском. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2007. № 6. С. 102–110.

10. Музичук В. І., Войтенко В. В. Дослідження деформації кузовних деталей автомобіля при ДТП. *Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК* : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. (Вінниця, 28–30 листоп. 2017 р.). Вінниця : ВНАУ, 2017. С. 96–100.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING PLASTIC DEFORMATIONS OF VEHICLE BODY PARTS DURING COLLISION

Dragobetskyi Volodymyr V., Dr. Sc. Tech., Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, kafedra.tehmash@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9637-3079>.

Moroz Mykola M., Dr. Sc. Tech., Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, mykolai.moroz@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6107-1230>.

Moloshtan Dmytro V., PhD, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, moloshtandima@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-8881-8541>.

Chernysh Andrii A., PhD, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, chernyshkrnu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9711-827X>.

Nikitina Alyona V., PhD, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, nikaalyonka@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0495-0604>.

Summary. The study is relevant because it aims to improve the accuracy of automotive technical expertise in road traffic accidents, which directly affects the objectivity of establishing collision circumstances and determining vehicle speed parameters. Existing methods for assessing plastic deformations of body parts are mainly based on static approaches that do not account for the dynamic nature of impact loads and the inertial properties of materials at the moment of collision. This leads to significant errors in determining the energy parameters of impact and reconstructing the mechanism of road traffic accidents.

The purpose of the study is to improve the method for describing the deformation and destruction processes of vehicle structural elements resulting from impact loads during collisions. The work aims to increase the accuracy and objectivity of automotive technical expertise by refining approaches to determining plastic deformations of vehicle body panels, taking into account modern requirements for road safety and the need for accurate reconstruction of traffic accident mechanisms.

Object of research – the process of public participation in project management.

Subject of research – regularities of plastic deformation of vehicle body parts, taking into account dynamic characteristics of materials, inertial properties, and energy balance of the system under collision conditions.

Research methodology. The study employs a comprehensive approach based on phenomenological theory, methods of deformable solid mechanics, and plasticity theory. For the mathematical modeling of material behavior under dynamic loading, Ritz analytical methods and the second-order Lagrange equations were applied. The methodology includes analysis of the system's energy balance, accounting for the work of external forces, stress intensity, degree of deformation, and material volume. The experimental part is based on impact tests (bending, tension, compression) to study the mechanical characteristics of metals in dynamic mode, particularly using the elastic rebound method to determine the hardness of deformed metal. Classification of body panels was also conducted according to curvature type and contour (single- and double-curvature elements, closed and open contours).

Keywords: automotive technical expertise, destruction, deformation, phenomenological theory, hardness, vehicles, road safety.

References

1. Ogorodnikov, V. A. and Serdiuk, V. F. (1996) *Restoration of machine parts by the method of plastic transformation*. Visnyk VPI. (3), pp. 58–62. [In Ukrainian].
2. Ogorodnikov, V. A. and Arkhipova, T. F. (2020) *Deformation energy of vehicles in road traffic accidents*. Naukovi pratsi VNTU. (3). Available at: <https://ntp.vntu.edu.ua/index.php/ntp/article/view/1234> (Accessed: 03.05.2026). [In Ukrainian].
3. Ogorodnikov, V. A. (2004) *Method for determining the speed of vehicles at the moment of collision*. Utility model patent No. 66462 A Ukraine, IPC G01N 19/00, G01N 33/20. Applicant and patent holder: Ogorodnikov V. A. No. 2003043308; appl. 14.04.2003; publ. 17.05.2004, Bul. No. 5. [In Ukrainian].

4. Ogorodnikov, V. A. (2018) *The Physical Model of Motor Vehicle Destruction under Shock Loading for Analysis of Road Traffic Accident*. Proc. SPIE 10808. Photonics Application in Astronomy, Communications Industry and High-Energy Physics Experiments. 186 p.
5. Makiienko, O. M., Yeshchenko, O. D. and Drahobetskyi, V. V. (2024) *Determination of the stress state index of the workpiece during explosive stamping by extreme values of normal stresses*. In: Actual problems of society's vital activity: Proceedings of the XXXI International Scientific and Practical Conference of students, graduate students and young scientists. Kremenichuk: KrNU, pp. 113–115. [In Ukrainian].
6. Ogorodnikov, V. A., Muzychuk, V. I. and Nakhaichuk, O. V. (2007) *Mechanics of cold transformation processes with typical deformation mechanism schemes: monograph*. Vinnytsia: Universum-Vinnytsia. 179 p. [In Ukrainian].
7. Stebliuk, V. I., Orliuk, M. V. and Kholiavik, O. V. (2012) *Determination of stress-strain state parameters during drawing of box-shaped parts from workpieces calculated by the potential method*. Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. (46), pp. 98–101. [In Ukrainian].
8. Drahobetskyi, V. V. (2001) *Development of combined methods of explosive metal processing as one of the directions for improving machine parts and units*. Naukovi notatky: Interuniversity collection. (9). Lutsk, pp. 139–145. [In Ukrainian].
9. Nakhaichuk, O. V., Ogorodnikov, V. A., Muzychuk, V. I. and Derevenko, I. A. (2007) *Diagnostics of materials for technical expertise and metal pressure processing*. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. (6), pp. 102–110. [In Ukrainian].
10. Muzychuk, V. I. and Voitenko, V. V. (2017) *Investigation of deformation of car body parts in road accidents*. In: Modern problems of production, processing of agricultural products, mechanical engineering and energy systems of agro-industrial complex: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference. Vinnytsia: VNAU, pp. 96–100. [In Ukrainian].

Дата надходження до редакції 11.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 09.02.2026.

**ОХОРОНА ПРАЦІ ГРОМАДЯН УКРАЇНИ В МАШИНОБУДІВНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ
ЧЕСЬКОЇ РЕСПУБЛІКИ**

**OCCUPATIONAL SAFETY OF UKRAINIAN CITIZENS IN THE MACHINE-BUILDING
INDUSTRY OF THE CZECH REPUBLIC**



*Нестер Анатолій Антонович, доктор технічних наук, доцент,
доцент кафедри будівництва та цивільної безпеки, Хмельницький
національний університет, Хмельницький, Україна,
e-mail: nesteranatol111@gmail.com,*

<https://orcid.org/0000-0002-1276-6068>

Анотація. Стаття присвячена аналізу чеської системи забезпечення охорони праці в машинобудівній промисловості Чехії, функціонуванню медичного страхування працюючих (в тому числі добровільне медичне страхування) та тих громадян, хто потрапив до республіки внаслідок бовових дій на території України. Розглянуто розвинуту систему медичного забезпечення населення та іноземців, серед яких достатньо велика кількість громадян України, що покинули межі держави з названої вище причини. Відмічено про широкий доступ іноземних громадян до ринку праці. Станом на січень 2026 р в Чехії перебуває близько 392-395 тисяч українців із тимчасовим захистом, а близько 152-155 тисяч українців мали трудові договори на початку 2025 року.

Метою статті є дослідження особливостей охорони праці українців у машинобудівній промисловості Чехії та вимагає аналізу правового поля ЄС/Чехії та України, адаптації українців (мовно-культурні бар'єри, відмінності в культурі безпеки), ролі українських діаспор та міграційних служб, а також взаємодії з чеськими інспекціями праці для забезпечення відповідності нормам ЄС і захисту прав працівників з України, що вимагає порівняльного підходу до регулювання та соціального захисту в обох країнах.

Для повного та успішного досягнення встановленої мети даного наукового дослідження в основу методологічного прийому покладено застосування загальнонаукових методів. А саме використано емпіричний рівень пізнання, спостереження та порівняння, фундаментні розвідки. Для узагальнення досліджень був обраний метод контент-аналізу. Теоретичні методи дослідження – аналіз, синтез та узагальнення – було застосовано для виокремлення проблемних питань.

Аналіз праць чеських та українських авторів, які вивчають положення українських громадян в Чеській Республіці свідчать, що громадяни України як і інші біженці мають повне право працевлаштування відповідно до свого фаху, бажань, можливостей та повинні бути забезпечені навчанням з питань охорони праці. Українці мають умовний вільний доступ до ринку праці.

Найпоширенішими видами дозволів є: карта працевлаштування, синя карта, позачергова робоча віза або дозвіл на працевлаштування.

Навчання з охорони праці у Чехії є обов'язковим для всіх працівників, включаючи іноземців, і регулюється Трудовим кодексом. Роботодавець зобов'язаний проводити інструктаж під час працевлаштування та періодичні навчання. Широка сфера медичного обслуговування та страхування громадян створюють сприятливі умови як для працюючих так і для навчання в Чеській Республіці і можуть стати прикладом для України.

Досліджено специфічні зв'язки між структурами влади та бізнесом в частині забезпечення охорони праці на машинобудівних підприємствах Чеської Республіки. На основі проведеного дослідження зроблено висновок щодо удосконалення системи страхування та медичного обслуговування працюючих в українській державі.

Науковий результат, отриманий в процесі цих досліджень, може бути використаний українською державою для вивчення, поширення на підприємствах та суспільстві в частині поглиблення медичного обслуговування та страхування громадян української держави.

Ключові слова: медичне забезпечення, страхування, чеські автори, карта працевлаштування, мігранти

Вступ. Утвердження незалежної української держави після розпаду Радянського Союзу, порушило перед Україною цілий комплекс питань щодо самостійного статусу, зокрема, формування владних структур, перехід до ринкової економіки, реформування збройних сил та забезпечення міжнародного миру. Ці питання повинні були вирішуватись спираючись на Акт проголошення незалежності 24 серпня 1991 року та підтримку Всеукраїнського референдуму. Але незалежність України та рух робочої сили тісно пов'язані: вона відкрила шлях до вільного переміщення людей, стала поштовхом до масової трудової міграції через економічні труднощі, що призвело до "відтоку мізків", але також створює умови для нових можливостей та інтеграції в європейський ринок праці; зараз війна загострила цю міграцію, але зміцнює ідентичність та прагнення до самостійного розвитку, де робоча сила є ключовим ресурсом.

Для подолання "відтоку мізків" потрібно дослідити причини, що змушують висококваліфікованих фахівців покидати країну. Але тут є і завдання держави серед яких наступні: забезпечення робочої силою ключових секторів економіки, щоб уникнути дефіциту кадрів; залучення та утримання талановитих людей для створення нових технологій, що підвищує конкурентоспроможність держави; розробка програм соціального захисту мігрантів, підтримки внутрішньо переміщених осіб та забезпечення рівних можливостей на ринку праці.

Таким чином, рух робочої сили є критично важливим чинником для досягнення стратегічних цілей держави у сфері економіки, соціального розвитку та інновацій, а його розуміння вимагає постійних наукових досліджень та адекватних практичних рішень.

В статті розглядаються питання охорони праці в Чеській Республіці, яка може стати прикладом для організації вирішення цих проблем в Україні.

Аналіз досліджень і публікацій з проблем охорони праці показує, що є в українській державі автори, серед яких викладачі ВУЗів (В.Березуцький, О.Нестеров, О.Нагурський), які працюють над проблемами охорони праці та збереження здоров'я працівників. Особливої уваги заслуговують роботи таких вітчизняних і чеських авторів, як О.Білик (Київський національний університет імені Тараса Шевченка), Wolters Kluwer, М. Копецька, Й.Стібіц, З. Шенк, E. Dandová, J. Slácal, P. Osička (автори чеської держави) та ін. Але достатньо серйозна кількість праць з охорони праці свідчить про інтерес суспільства та фахівців, вивчення досвіду розвинутих держав, серед яких Чехія, для вирішення проблем з питань, пов'язаних з охороною праці.

Матеріали та методи. Статистичні дані та публікації цілого ряду фахівців свідчать про те, що основні проблеми охорони праці в Україні включають низьку культуру безпеки, недостатнє фінансування профілактики, застаріле обладнання та відсутність ефективної системи соцстрахування від ризиків на виробництві, а в світі – це зростання небезпечних форм зайнятості (гіг-економіка- це модель "економіки на вимогу", що надає свободу, але й несе ризики нестабільності та відсутності соціальних гарантій, характерних для штатного працевлаштування), психосоціальні ризики, вплив зміни клімату та цифровізація робочого місця, що вимагає переосмислення безпеки праці.

Проблематика охорони праці в Чехії зосереджена на питаннях адаптації іноземних працівників (особливо українців) щодо нерозуміння норм, мовних бар'єрів, відсутності документів (страховки), та

наслідків нещасних випадків (важкі юридичні та фінансові питання для всіх сторін). Роботодавці стикаються з ризиками через недбалість або некомпетентність іноземців, а самі працівники – з небезпекою травмування через недостатнє навчання. Ключовим є впровадження чітких інструктажів, забезпечення належної культури безпеки та вирішення питань медичного обслуговування для всіх.

Метою роботи є дослідження особливостей охорони праці українців у машинобудівній промисловості Чехії та вимагає аналізу правового поля ЄС/Чехії та України, адаптації українців (мовно-культурні бар'єри, відмінності в культурі безпеки), ролі українських діаспор та міграційних служб, а також взаємодії з чеськими інспекціями праці для забезпечення відповідності нормам ЄС і захисту прав працівників з України, що вимагає порівняльного підходу до регулювання та соціального захисту в обох країнах.

Для досягнення поставленої мети у статті вирішуються такі завдання:

- виробництво в чеській державі на сьогоdnішньому етапі;
- логістика та можливості переміщення в державі;
- розвиток технологій та ІТ для пошуку елементів зайнятості;
- реалізація норм охорони праці на підприємствах з українськими працівниками.

Виклад основного матеріалу. Станом на кінець 2024 — початок 2025 року, понад 150-155 тисяч громадян України з тимчасовим захистом офіційно працювали в Чехії, причому жінки складали більшість, а найчастіше вони були зайняті у будівництві, машинобудівному виробництві та транспорті, допомагаючи вирішувати дефіцит робочої сили в країні [1].

Право мігрантів працювати в Чехії залежить від типу статусу проживання або країни походження. Перш за все, громадянина слід з'ясувати, чи іноземець має вільний або умовний доступ до ринку праці. Якщо іноземець має вільний доступ до ринку праці, інший дозвіл на працевлаштування йому не потрібен. У разі умовного доступу, іноземцю потрібно оформити один із дозволів. Найпоширенішими видами дозволів є: карта працевлаштування, синя карта, позачергова робоча віза або дозвіл на працевлаштування.

Робоча чеська карта — це пластиковий документ з біометричними даними, який видається на термін до 2 років з можливістю продовження. Вона прив'язана до конкретного роботодавця та вакансії, зареєстрованої в Центральній базі вакансій Міністерства праці Чехії. Зміна роботодавця або посади можлива, але вимагає повідомлення Міністерства внутрішніх справ Чехії.

Синя карта (Modrá karta) в Чехії — це єдиний дозвіл на тривале проживання та роботу для громадян третіх країн (не членів ЄС) з високою кваліфікацією. Вона вимагає вищої освіти та зарплати (понад 1,5 середньої по країні). Карта діє як дозвіл на роботу на конкретній позиції, спрощує працевлаштування та видається на термін договору плюс 3 місяці.

Позачергова (швидка) робоча віза в Чехію (зазвичай у межах програми «Режим Україна») дозволяє українцям отримати довгостроковий дозвіл (тип D) або трудову карту швидше, уникаючи довгої черги на подачу документів. Основою є офіційне запрошення від роботодавця. Процес займає менше часу, ніж звичайна процедура, часто через спеціальні візові центри.

Робоча карта Чехії (Zaměstnanecká karta) — це офіційний дозвіл, який дозволяє громадянам третіх країн легально працювати та проживати в Чеській Республіці понад 90 днів. Цей документ поєднує в собі дозвіл на роботу та проживання, що значно спрощує процес легалізації для іноземців. Оформити дозвіл на працевлаштування в Чехії дозволить іноземцю працювати законно в даній країні [2].

Достатньо велика чисельність українців наприкінці 2024 - початку 2025 року мала статус тимчасового захисту (lex specialis) — це особливий механізм швидкого надання прав біженцям з України в ЄС, що дозволяє легально проживати, працювати, навчатися та отримувати соціальну й медичну допомогу одразу після в'їзду, оминаючи тривалі процедури біженства, забезпечуючи швидкий доступ до основних послуг та можливість повернутися додому. Він надає ті ж права, що й статус біженця, але в спрощеному, прискореному порядку, діючи як спеціальний закон (lex specialis) для громадян України. Переважна більшість громадян України — жінки (близько 60-62%). Найпопулярніші галузі працевлаштування — будівництво, машинобудівне виробництво, транспорт,

склади. Українські біженці в Чехії сплачують більше податків та внесків, ніж отримують допомоги, позитивно впливаючи на бюджет [1].

Ці дані показують високий рівень залученості українців до чеського ринку праці, де вони заповнюють критично важливі для цієї країни вакансії. Приплив українських біженців до Чехії значно збільшився протягом останніх місяців. За даними МВС країни, кількість дозволів на тимчасовий захист виросла більш ніж у два рази, досягнувши рекордного значення. Якщо до вересня влада видавала в середньому по 1,5 тис. таких дозволів на місяць, то через два місяці цей показник підскочив до 3,1 тис. Як пояснила пресекретар МВС ЧР Гана Мала, основною причиною став дозвіл Києва, який дозволив молодим людям від 18 до 22 років безперешкодно виїжджати з країни [3].

Загалом за вересень було встановлено рекорд року – видано 13,5 тис. дозволів. Загальна кількість українських біженців у Чехії наближається до 400 тис., що є найвищим показником ЄС на душу населення. Видання (Главком) дійшло висновку, що, незважаючи на зміну влади, ставлення до біженців, що працюють у Чехії, змінюватися не повинно. Статус тимчасового захисту, який діє до березня 2026 року, в ЄС уже планують продовжити [1].

Станом на січень 2026 року в Чехії перебуває близько 392-395 тисяч українців із тимчасовим захистом, хоча цифри можуть коливатися; країна посідає третє місце в ЄС за загальною кількістю та перше за співвідношенням біженців до населення, переважно це жінки та діти. Дуже важливо також, що від самого початку перебування в Чехії (після карантину) іноземець має таке саме право на медичне забезпечення, як і чеський громадянин. Чехія в разі потреби повністю покриває видатки на лікування наслідків фізичних чи психічних переслідувань громадян, яких вони зазнали в країнах свого походження. Прохач притулку на теренах Чехії забезпечується всім головним, потреба працювати до цього не належить. Але українські громадяни влаштовуються на роботу та не стають обузою для Чехії.

З великою кількістю українських працівників на чеських підприємствах виникає необхідність зменшити мовний бар'єр. Хоча чеська та українська мова близькі, у різних технічних термінах є істотна різниця. А розуміння потрібне повне. Тому деякі документи, як-от зразок трудового договору або інструкції з безпеки праці та протипожежної безпеки (т зв. BOZP а PO) можна знайти у перекладі на українську.

Цим, в основному, займається Інспекторат праці (SUIP) або Дослідницький інститут праці та соціальних справ (VUBP). Але кожне машинобудівне підприємство має, звісно ж, свої власні вимоги до безпеки праці. Якщо трудовий договір або угода укладається з працівником, який недостатньо або зовсім не розуміє чеської мови, рекомендується складати їх двомовним варіантом (спочатку чеською, а потім мовою, яку працівник явно розуміє), пояснює Дагмар Кучерова із Палати бухгалтерів Чеської Республіки. Ця процедура допомагає уникнути подальших ускладнень через текст документа лише чеською або лише іншою мовою. Утім, це є тільки рекомендацією: обов'язок перекладу трудового договору на рідну мову працівника не впливає з будь-якої чинно правової норми [4].

Однак на випадок трудового спору доцільно попросити працівника засвідчити те, що він зрозумів суть трудового договору і зробив цю заяву мовою, якою також складено договір. В ідеалі — своїми словами співробітника (від руки, а не надрукованими на комп'ютері). Звісно, кожне підприємство має свій власний зрієць трудового договору, але в інтернеті можна знайти чимало загальних зразків. Переклад типового чеського трудового договору на українську мову можна знайти, наприклад, на правничому й кадровому сайті Чеської держави.

Інженерія безпеки в Чехії – це перспективна галузь, що охоплює інформаційну, промислову та екологічну безпеку, з можливістю безкоштовного навчання в державних ВНЗ (наприклад, Технічний університет в Оставі) при знанні чеської мови, а також з високим попитом на спеціалістів ІТ та промисловості з гідними зарплатами. Навчання з охорони праці (BOZP) у Чехії є обов'язковим для всіх працівників, включаючи іноземців, і регулюється Трудовим кодексом; воно включає інструктаж під час працевлаштування та періодичні навчання, які проводить роботодавець, але законодавство не визначає їх точної форми чи обсягу, підкреслюючи лише необхідність належного проведення, що часто включає матеріали чеською мовою та може бути адаптованим для українців [5].

Перший день праці на чеському машинобудівному підприємстві починається з інструктажу з техніки безпеки. Питання навчання працівників про безпеку та охорону здоров'я на роботі регулюється законодавством Чеської Республіки. Закон № 262/2006- це чеський Трудовий кодекс (Zákoník práce, Z. č. 262/2006 Sb.), який регулює трудові відносини, права та обов'язки працівників і роботодавців, включаючи укладання договорів, робочий час, відпустки та оплату праці. Цей закон визначає, що робота по найму (závislá práce) має елементи підпорядкування роботодавцю, а трудовий договір має бути письмовим та містити місце роботи і дату початку. Стаття 37, пункт 5 цього документа вказує: «Працівник при вступі на роботу повинен бути ознайомлений з правилами праці, законодавчими та іншими нормативними актами, що забезпечують безпеку і охорону здоров'я на виробництві, яких він зобов'язаний дотримуватись під час роботи». Також працівник повинен бути ознайомлений з колективним договором і правилами внутрішнього розпорядку [6].

Тому роботодавець не уникне планового навчання безпеки праці нових працівників, у тому числі іноземців. В першу чергу це стосується питань охорони здоров'я та безпеки праці. Чинне законодавство (§ 103, пункт 3 згаданого Кодексу законів про працю) не визначає форми, обсягу, змісту та періодичності навчання з охорони праці, але підкреслює, що навчання повинно проводитися належним чином, чітко, конкретно та доказово. “BOZP a PO” проводять різноманітною формою – не тільки за допомогою нудних лекцій чи летючок, але й за допомогою відеографічних матеріалів, коміксів навіть з легким гумором [2].

Спеціаліст з питань безпеки праці Мартін Шимек пояснює, що «належне навчання» має проводитися із дотриманням визначених термінів повторення. Знання працівників перевіряються доказово (наприклад, за допомогою тесту або співбесіди з контрольним списком). Усі записи про навчання мають бути заархівовані. А «зрозуміле навчання» має дати відповідну й послідовну інформацію про роботу. Працівникові, у тому числі іноземцю, має бути відведено достатньо часу, щоб все повністю зрозуміти.

Спеціальне навчання включає чіткі інструкції від роботодавця щодо безпеки праці. Навчання має бути не тільки загальним, а й з конкретними на даному підприємстві й робочому місці вимогами до поведінки працівника. Вони є необхідними для безпечного виконання роботи. Роботодавець також має ознайомити працівника із гігієнічними вимогами або можливими ризиками при виконанні роботи та у разі недотримання вимог. Також навчання співробітників може проводитися формою онлайн-курсів. Воно може бути доповнено практичним навчанням або практичною демонстрацією, яка краще пояснить працівникові діяльність і, можливо, доповнить вимоги до виконання відповідної роботи [5].

Вступний інструктаж з охорони праці проводиться, коли працівник починає роботу. Це не завжди може бути лише новий працівник. Стосується це і зміни класифікації, посад або посади вже працевлаштованого працівника. Адже переведення на іншу посаду може мати значний вплив на гігієну та безпеку праці. Також інструктаж проводиться при зміні технології або робочого процесу або у випадках, коли робота може мати серйозний вплив на безпеку й охорону здоров'я при праці й протипожежну безпеку.

Вступний інструктаж з охорони праці завжди проводиться в перший день роботи, незалежно від випробувального терміну працівника. Він поширюється не тільки на працівників, які працюють за основним трудовим договором, а й на тих, чий трудовий договір є додатковим або які працюють як тимчасові працівники.

Роботодавець повинен забезпечити навчання за власний рахунок і в робочий час працівника. Вступний інструктаж з охорони праці поділяється на два види – загальний і практичний, який відбувається безпосередньо на робочому місці. Вступний інструктаж може містити різну інформацію залежно від професійної спрямованості трудової діяльності.

Достатньо серйозно в чеській державі відносяться до страхування. Так економічно неактивний громадянин ЄС може бути застрахований у Чехії, якщо він підтвердить тимчасове перебування або фактичну адресу проживання (наприклад, договір оренди, рахунки за комунальні послуги і т.д.). Громадянин ЄС, який працює в Чехії, повинен зареєструватися в чеській медичній системі й

відмовитися від страхування в країні походження. Якщо громадянин ЄС не застрахований у Чехії, його страхування оплачує країна походження, і він має право на Європейську картку медичного страхування (EHIC), яка забезпечує необхідне медичне обслуговування.

Якщо громадянин подає заяву на дозвіл на довгострокове перебування у Чехії або на його продовження, він повинен надати договір комплексного медичного страхування іноземців. Така страховка повинна бути передплачена на весь термін запланованого перебування (до 2-х років). Якщо іноземець має комерційне медичне страхування, допомогу такій людині надає тільки обмежена кількість лікарів й установ, а саме такі, які уклали договір з страховою компанією. Тому перелік договірних лікарів та установ надає страхова компанія, з якою підписано договір.

Іноді лікар може вимагати за надання медичної допомоги оплату готівкою. Страхова компанія у такому разі відшкодовує громадянину витрати заднім числом, тому необхідно просити у лікаря квитанцію. Важливо уважно читати умови страхового договору та з'ясувати, які є винятки зі страхового відшкодування.

Комерційне медичне страхування іноземців є передплаченим, тому при поїзді з Чехії за кордон його не можна анулювати або призупинити. Дію договору загальнообов'язкового медичного страхування можна призупинити, якщо громадянин буде жити за межами Чехії більше 6 місяців.

Українці з тимчасовим захистом мають права, близькі до громадян Чехії та осіб з постійним місцем проживання. Основна відмінність – тимчасовість статусу, необхідність його продовження та обмежений доступ до деяких соціальних послуг. Порівняно з іншими іноземцями (робочі візи, карти), українці мають ширший і простіший доступ до працевлаштування, змін роботи та страхування. Але не мають права працювати в інших країнах ЄС, на відміну від громадян ЄС.

Після отримання тимчасового захисту українці автоматично включаються до публічного медичного страхування. Перші 150 днів внески сплачує держава. Після цього – роботодавець (якщо людина працевлаштована) або особа самотійно. Внески у 2025 році становлять близько 2 808 Kč/міс. для непрацюючих.

Соціальне страхування охоплює пенсійне забезпечення, допомогу по безробіттю, декретні. Виплати по безробіттю доступні після 12 місяців стажу. Перші два місяці – 80% від чистої зарплати, далі – 60% і 40%. Також доступна гуманітарна допомога – 4860 Kč на дорослого в перші 5 місяців, потім – зменшується. Для оформлення слід звертатися до Úřad práce ČR [7].

Українці з чинним статусом тимчасового захисту можуть працювати без дозволу на працевлаштування. Це означає, що роботодавцю не потрібно проводити тест ринку праці або отримувати попереднє погодження на найм. Працевлаштування можливе як за стандартними трудовими договорами, так і за цивільноправовими контрактами (DPP, DPČ). Всі працівники мають право на мінімальну заробітну плату, обмеження тривалості робочого дня та оплачувані відпустки [8].

Статус захисту підтверджується візовою наклейкою або штампом у паспорті. Роботодавець має повідомити біржу праці (Úřad práce ČR) про факт працевлаштування іноземця. Якщо ви не продовжите статус захисту, ви втрачаєте право на легальну роботу, і роботодавець змушений буде припинити трудові відносини. Станом на 2025 рік захист продовжено до 31 березня 2026 року, за умови онлайн-реєстрації та оновлення документів.

Медичну допомогу в ЧР надає широка мережа закладів ОЗ, що мають декілька форм власності: приватна (амбулаторна медична допомога — самотійно практикуючі лікарі та їх об'єднання — поліклініки, центри первинної допомоги); державна — стаціонарна медична допомога (лікарні, університетські клініки).

Другим учасником процесу надання медичної допомоги у ЧР є фонди медичного страхування. Найбільший серед них — Фонд всезагального медичного страхування (ФВМС, Všeobecný zdravotní pojišťovna), засновником і гарантом діяльності якого є держава. ФВМС має складну систему управління, у якій є представники від держави, застрахованих та роботодавців. Генерального директора ФВМС обирає парламент, що свідчить про важливість даної посади. Загалом в Чеській Республіці існує ще 8 страхових фондів (наприклад, медичний страховий фонд міністерства

внутрішніх справ, міністерства оборони, компанії «Шкода»), але вони страхують виключно своїх співробітників. Основне завдання фондів — фінансування галузі на основі страхових внесків.

Страхова система фінансується внесками фізичних осіб, роботодавців і державою, що платить за безробітних, пенсіонерів, дітей, студентів, вагітних, військових — приблизно за 56 % населення. Держава виступає гарантом страхової системи. Вийти із системи медичного страхування в ЧР неможливо.

Страхові внески на медичну допомогу стягуються як частина заробітку (до відрахування податків): 4,5 % платять робітники і 9 % — роботодавці, разом — 13,5 %. Приватні підприємці платять ті ж 13,5 %, але від 35 % прибутку. Міністерство фінансів щомісячно оплачує внески за непрацюючих — 13,5 % від мінімального місячного заробітку, встановленого державою.

Страхові фонди укладають договори з постачальниками медичних послуг та громадянами ЧР (потенційними пацієнтами). У випадку захворювання пацієнт звертається до лікаря, який надає необхідну медичну допомогу, а оплату проводить страховий фонд.

Висновки. Аналіз праць чеських та українських авторів, які вивчають положення українських громадян в Чеській Республіці свідчать, що громадяни України як і інші біженці мають повне право працевлаштування відповідно до свого фаху, бажань та можливостей. Українці мають умовний вільний доступ до ринку праці.

Найпоширенішими видами дозволів є: карта працевлаштування, синя карта, позачергова робоча віза або дозвіл на працевлаштування. Деякі особливості оформлення перерахованих документів створюють певні труднощі, але практично кожен може знайти роботу. Так синя карта дає можливість працевлаштування фахівців з високою кваліфікацією. Вона вимагає вищої освіти та зарплати (понад 1,5 середньої по країні).

Навчання з охорони праці у Чехії є обов'язковим для всіх працівників, включаючи іноземців, і регулюється Трудовим кодексом. Роботодавець зобов'язаний проводити інструктаж під час працевлаштування та періодичні навчання. Необхідно відмітити, що законодавство не визначає форму чи обсяг проведення, підкреслюючи лише необхідність належного проведення. Це дає можливість роботодавцю самостійно визначати способи, час, кваліфікацію і т.д.

Широка сфера медичного обслуговування та страхування громадян створюють сприятливі умови як для працюючих так і для навчання в Чеській Республіці і можуть стати прикладом для України.

Науковий результат, отриманий в процесі цих досліджень, може бути використаний українською державою для вивчення, поширення на підприємствах та суспільстві.

Перелік посилань

1. Озтурк І. У Чехії різко зросла кількість біженців з України. 2025. URL: <https://glavcom.ua/world/observe/u-chehiji-rizko-zrosla-kilkist-bizhentsiv-z-ukrajini-1085205.html> (дата звернення: 03.01.2026).
2. Šenk Z. Bezpečnost a ochrana zdraví při práci : prakticky a přehledně podle normy ČSN OHSAS 18001:2008. Olomouc : ANAG, 2009. 279 s.
3. Про внесення змін до Правил перетинання державного кордону громадянами України : Постанова Кабінету Міністрів України від 26 серп. 2025 р. № 1031. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1031-2025-п#Text> (дата звернення: 03.01.2026).
4. Dandová E. Bezpečnost a ochrana zdraví při práci v otázkách a odpovědích. Praha : ASPI, 2004. 123 s.
5. Лівінський О. Робота у Чехії «начорно», тобто нелегально, без договору: якими є невігоди та ризики. 2024. URL: <https://proukrainu.blesk.cz/robota-u-cechiji-nacorno-tobto-nelehaljno-bez-dohovoru-jakymy-je-nevyhody-ta-ryzyky/> (дата звернення: 03.01.2026).
6. Zákoník práce : Z. č. 262/2006 Sb. 2006. URL: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-262> (дата звернення: 03.01.2026).

7. Білик О. А. Особливості правового регулювання часткового безробіття в Чехії. *Науковий вісник публічного та приватного права*. 2019. Вип. 1, т. 2. С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.32844/2618-1258.2019.1-2.6>.

8. Kočí M., Kopecká M., Stiebitz J. Průvodce odborně způsobilých osob problematikou bezpečnosti a ochrany zdraví při práci, hornické činnosti a požární ochrany. Olomouc : ANAG, 2013. 397 s.

OCCUPATIONAL SAFETY OF UKRAINIAN CITIZENS IN THE MACHINE-BUILDING INDUSTRY OF THE CZECH REPUBLIC

Nester Anatoliy A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Civil Safety, Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine, e-mail: nesteranatol111@gmail.com, tel. +380963261158, <https://orcid.org/0000-0002-1276-6068>

Summary. The article is devoted to the analysis of the Czech occupational safety system in the Czech Republic's machine-building industry, the functioning of health insurance for workers (including voluntary health insurance) and those citizens who arrived in the republic as a result of hostilities on the territory of Ukraine. The article examines the developed system of medical care for the population and foreigners, including a large number of Ukrainian citizens who have left their country for the above-mentioned reason. It notes the broad access of foreign citizens to the labor market. As of January 2026, there are about 392-395 thousand Ukrainians with temporary protection in the Czech Republic, and about 152-155 thousand Ukrainians had employment contracts at the beginning of 2025.

The purpose of this article is to examine the peculiarities of occupational safety for Ukrainians in the Czech Republic's machine-building industry and requires an analysis of the legal framework of the EU/ Czech Republic and Ukraine, the adaptation of Ukrainians (linguistic and cultural barriers, differences in safety culture), the role of Ukrainian diasporas and migration services, as well as interaction with Czech labor inspectorates to ensure compliance with EU standards and the protection of the rights of workers from Ukraine, which requires a comparative approach to regulation and social protection in both countries.

To fully and successfully achieve the established goal of this scientific research, the methodological approach is based on the application of general scientific methods. Specifically, empirical knowledge, observation and comparison, and fundamental research were used. The content analysis method was chosen to summarize the research. Theoretical research methods—analysis, synthesis, and generalization—were used to identify problematic issues.

An analysis of works by Czech and Ukrainian authors studying the situation of Ukrainian citizens in the Czech Republic shows that Ukrainian citizens, like other refugees, have the full right to employment in accordance with their profession, desires, and abilities, and must be provided with training in occupational safety. Ukrainians have conditional free access to the labor market.

The most common types of permits are: employment card, blue card, extraordinary work visa, or work permit.

Occupational safety training in the Czech Republic is mandatory for all employees, including foreigners, and is regulated by the Labor Code. Employers are required to provide training during employment and periodic refresher courses. The wide range of medical services and insurance available to citizens creates favorable conditions for both working and studying in the Czech Republic and could serve as an example for Ukraine.

Specific links between government structures and business in terms of occupational safety at machine-building enterprises in the Czech Republic have been studied. Based on the study, conclusions have been drawn regarding the improvement of the insurance and medical care system for workers in Ukraine.

The scientific results obtained in the course of this research can be used by the Ukrainian state to study and disseminate among enterprises and society in terms of improving medical care and insurance for Ukrainian citizens.

Keywords: medical care, insurance, Czech authors, employment card, migrants

References

1. Iryna Ozturk. (2025). The number of refugees from Ukraine has risen sharply in the Czech Republic. URL: <https://glavcom.ua/world/observe/u-chekhiji-rizko-zrosla-kilkist-bizhentsiv-z-ukrajini-1085205.html>. [in Ukrainian]
2. Zdeněk Šenk. (2009) Occupational health and safety: practical and clear according to the ČSN OHSAS 18001:2008 standard. Olomouc: ANAG. 279 pp. [in Czech]
3. On amendments to the Rules for crossing the state border by citizens of Ukraine. Cabinet of Ministers of Ukraine. Resolution No. 1031 of August 26, 2025. Kyiv. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1031-2025-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian]
4. Eva Dandová. (2004). Occupational health and safety in questions and answers. Prague: ASPI, 123 pp. [in Czech]
5. Livinsky, O. (2024). Working in the Czech Republic “off the books,” i.e., illegally, without a contract: what are the disadvantages and risks? URL: <https://proukrainu.blesk.cz/robota-u-cechiji-nacornotobto-nelehaljno-bez-dohovoru-jakymy-je-nevyhody-ta-ryzyky/> [in Ukrainian]
6. Labor Code, (2006). Act No. 262/2006 Coll. URL: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-262>. [in Czech]
7. Bilyk O.A. (2019) Features of legal regulation of partial unemployment in the Czech Republic. Scientific Bulletin of Public and Private Law. Issue 1, Volume 2, pp. 33-38. DOI <https://doi.org/10.32844/2618-1258.2019.1-2.6>. [in Ukrainian]
8. Miroslav Kočí, Miroslava Kopecká, Jindřich Stiebitz. (2013). Guide for professionally qualified persons on occupational health and safety, mining activities, and fire protection. Olomouc: ANAG, 397 p.p. [in Czech]

Дата надходження до редакції 20.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 15.01.2026.

INTELLIGENT MODELS AND METHODS FOR NAVIGATION AND OPERATION OF CONTAINER SHIPS



Kulbovskiy Ivan, candidate of science in engineering, National Transport University, Kyiv, Ukraine, i.kulbovskiy@ntu.edu.ua,

<http://orcid.org/0000-0002-5329-3842>



Liubarets Ihor, postgraduate student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, lyubarec@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1810-1435>

Abstract. The article substantiates the feasibility of intellectualizing navigation and operational management of container ships under transoceanic transportation conditions. It is demonstrated that traditional voyage planning methods do not account for dynamic hydrometeorological conditions, navigational constraints, vessel technical state, and loading parameters. An integrated operational efficiency model is proposed that combines navigational, operational, energy, and economic indicators into a single decision-support metric. An intelligent voyage management algorithm based on AIS data, satellite monitoring, and predictive models is developed. Simulation results demonstrate fuel consumption reduction of up to 11.7%, voyage time reduction of 5.6%, and schedule deviation reduction of 71%.

The object - the process of operating container ships in transoceanic transportation.

The purpose – development of methodological approaches to the intellectualization of navigation and control to increase the efficiency of container ship operation.

Research methods - analytical, systems analysis, comparative and mathematical modeling elements.

Transoceanic container transportation is characterized by long routes, high variability of weather conditions and significant fuel consumption. Traditional methods of voyage planning are based on static routes and average climatic data, which does not correspond to modern operating conditions. The development of maritime transport is associated with the introduction of intelligent systems capable of integrating heterogeneous data and providing adaptive management.

Modern and high-quality management of navigation and operation processes of container ships is one of the priority areas for increasing the efficiency of maritime transportation in transoceanic traffic in terms of reducing fuel costs, reducing the duration of voyages, increasing navigation safety and reducing the load on ship power plants. In the conditions of increasing dynamics of hydrometeorological factors, the intensity of sea routes and requirements for environmental friendliness of transportation, traditional approaches to voyage planning no longer provide the proper level of efficiency of vessel operation.

In order to improve the effectiveness of voyage management, the article proposes an integrated model for the systematic assessment of the efficiency of container ship operation based on a set of navigational, operational, energy and economic indicators using electronic cartography data, satellite monitoring and intelligent information processing algorithms.

The purpose of the study is to determine a scientifically sound approach to organizing intelligent decision-making support during container ship traffic management in transoceanic transportation by integrating evaluation results into the processes of route planning, speed selection, and real-time adjustment of voyage parameters.

The results of the study can be recommended for implementation in information and analytical systems for managing maritime transportation and fleet operation of shipping companies in order to increase their operational efficiency, economic feasibility and competitiveness in the global maritime transportation market..

Keywords: container ship, intelligent navigation, ship management, voyage optimization, operational efficiency, model, optimization.

Problem statement.

Transoceanic container transportation is characterized by long route distances, high variability of hydrometeorological conditions, intensive traffic along major sea corridors, and a significant share of fuel costs in vessel operating expenses. In practice, voyage planning is still often performed using static routing schemes that do not account for real-time weather dynamics, sea state, traffic restrictions, vessel loading conditions, and propulsion system operating modes. This results in excessive fuel consumption, longer voyage duration, accelerated equipment wear, and reduced operational efficiency of container ships.

Shipping companies currently face several challenges that complicate effective voyage management, including limited operational analytics for optimal route selection, fragmentation of navigational and technical data, and insufficient integration between navigation information, vessel performance parameters, and economic voyage indicators. As a consequence, many decisions remain based primarily on crew experience and predefined routes rather than on integrated digital decision-support tools.

The conceptual basis for digital integration of marine navigation data is defined by international standards for e-navigation and the S-100 universal hydrographic data model. In addition, global vessel movement data obtained from the Automatic Identification System create significant potential for route analytics. However, these information flows are typically used separately and do not form a unified decision-support framework for intelligent voyage management.

Traditional approaches to planning transoceanic voyages rely on regulatory route charts, average climatic characteristics of navigation areas, and fixed speed regimes. Such approaches do not adequately reflect the specific conditions of an individual voyage, including dynamic weather changes, actual vessel loading, technical condition of the power plant, and historical operational data. As a result, route, speed, and system operation decisions may be insufficiently justified, leading to increased costs, reduced reliability, and elevated navigational risks.

In addition, the lack of an integrated approach to processing navigational, technical and economic data limits the capabilities of shipping companies for strategic fleet management. This is manifested in the absence of a system for predicting optimal voyage parameters, the inability to promptly adjust the route in the event of changing sailing conditions, and the insufficient use of the potential of modern navigation and information technologies.

Therefore, the current scientific and practical task is to develop a systematic approach to the intellectualization of navigation and management processes of container ships in transoceanic transportation, which will allow:

- to integrate navigational, hydrometeorological, technical and economic data into a single information and analytical system;
- to form objective integral indicators of the efficiency of vessel operation during the voyage;

- to carry out adaptive planning of the route and speed regime taking into account real navigation conditions;

- to ensure operational adjustment of voyage parameters in real time;
- to optimize fuel consumption, voyage duration and load on ship mechanisms.

The implementation of such an approach will ensure increased shipping safety, reduced operating costs, and increased efficiency in the use of container ships in transoceanic transportation, which makes this problem extremely relevant both for scientific research and for the practical activities of shipping companies.

Analysis of recent research and publications. Analysis of scientific research shows that the problem of intellectualization of navigation processes and ship traffic management in transoceanic transportation is actively considered in the context of increasing the efficiency of container ship operation, reducing fuel costs and increasing the safety of maritime transportation. The works of K. Kim, J. Lee and H. Park [1–3] investigate algorithms for optimizing ship routes using navigation system data, hydrometeorological forecasts and machine learning models, which allows predicting optimal speed regimes and arrival times, minimizing fuel consumption and voyage duration. The authors S. Zhang, Y. Wang and M. Li [4] propose integrated fleet management models taking into account the technical condition of ships, the efficiency of energy systems and the risks of malfunctions, which allows improving maintenance planning and reducing downtime.

The studies of F. Bagheri, J. Lee and A. Tewari [5] substantiate the concept of digital integration of navigational, technical and economic data for adaptive voyage planning and real-time decision-making. At the same time, the works of D. Zhang et al. [6] consider modern approaches to integrating navigational risk assessment into the decision-making process, which allows to increase shipping safety and optimize routes taking into account probabilistic scenarios. The studies of K. Kim, J. Lee and H. Park [7] are devoted to the application of artificial intelligence methods for optimizing ship routes in variable marine environment conditions. In turn, C. Gkerekos and I. Lazakis [8-10] analyze the possibilities of using modern machine learning models for predicting and optimizing fuel consumption by seagoing vessels, which ensures increased energy efficiency and reduced operating costs in real-world maritime transportation conditions.

However, despite the existing scientific achievements, the issue of comprehensive integration of navigational, technical and economic data into a single decision support system for transoceanic container ships has not been sufficiently investigated. This necessitates further research in the direction of developing intelligent voyage management models that provide adaptive route planning, reduce operating costs and increase transportation safety.

The purpose The aim of the work is to develop an integrated model of intelligent management of a container ship voyage. To achieve this goal, it is necessary to:

- ✓ form a system of voyage efficiency indicators;
- ✓ develop an integrated efficiency indicator;
- ✓ propose an algorithm for intelligent vessel movement management.

Presentation of the main material.

One of the key areas is the development of integrated decision-making models that combine information on the technical condition of the vessel, forecast data on navigation and weather conditions, and economic indicators of operation [11]. This allows the formation of complex integrated indicators of transportation efficiency, which are used for:

- optimization of the route and speed of the vessel;
- reduction of fuel consumption and operating costs;
- improvement of technical readiness and safety of navigation;
- planning of maintenance and repair based on the actual condition of the vessel.

The article proposes a systematic approach to assessing the efficiency of container ship operation using intelligent algorithms, which allows integrating data on the technical condition of the vessel, navigation conditions and production indicators. The implementation of such an approach ensures increased productivity of transport operations, reduced operating costs and reduced influence of the human factor on the decision-making process in transoceanic transportation.

Table 1 – Correspondence of indicator groups to components of the integral model
Таблиця 1 – Відповідність груп індикаторів компонентам інтегральної моделі

Component	Indicator group	Examples
Ts	Technical condition indicators	Engine status, power systems, onboard equipment
Op	Operational performance indicators	Average speed, voyage time, port downtime
Ce	Economic and energy indicators	Fuel consumption, voyage cost
Nf	Navigational and weather indicators	Route length, sea state, restrictions

Table 1 demonstrates the direct correspondence between the indicator groups and the components of the integral efficiency model (1). This eliminates inconsistency between the descriptive classification of indicators and the mathematical formulation of the efficiency criterion. These groups of indicators directly correspond to the components Ts, Op, Ce, and Nf used in the integral efficiency model.

The integral indicator of the efficiency of container ship operation is formed on the basis of a comprehensive consideration of the technical condition of the vessel, navigation conditions, fuel consumption and other economic indicators. This approach allows assessing the overall efficiency of transportation in the form of a single generalized numerical value, which simplifies the comparison of alternative solutions and planning of optimal operating modes.

The main components of the integral indicator are:

- ✓ technical condition of the vessel - assessment of the operation of engines, power supply systems, hydraulics and navigation equipment;
- ✓ operational indicators - average speed, voyage duration, port downtime, container loading efficiency;
- ✓ economic indicators - fuel consumption, maintenance and repair costs, operating costs per voyage;
- ✓ navigational and weather conditions - the impact of waves, currents, wind and other factors on the route and resource consumption.

The integral indicator is calculated as the weighted sum or arithmetic mean of the normalized values of the individual components:

$$E_i = w_1 \cdot T_s + w_2 \cdot O_p + w_3 \cdot C_e + w_4 \cdot N_f, \quad (1)$$

Where E_i – integral efficiency indicator for the i-th voyage;

T_s – technical condition of the vessel;

O_p – performance indicators;

C_e – economic costs;

N_f – navigation and weather factors;

w_1, w_2, w_3, w_4 – component weighting factors (determined by experts or by the analytical hierarchy method).

To ensure the comparability of heterogeneous performance indicators in the integral efficiency model (1), all components are normalized to a dimensionless scale [0;1][0;1][0;1]. The normalization is performed using the min–max method based on statistical data of previous voyages and operational standards of container ships.

For benefit-type indicators (the larger the better):

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}.$$

For cost-type indicators (the smaller the better):

$$X_{norm} = \frac{X_{max} - X}{X_{max} - X_{min}},$$

where X_{min} and X_{max} are determined from AIS statistics, technical documentation of vessels, and historical voyage data.

For example, the technical condition value of 85% is converted into 0.85 as it lies within the admissible operational range [0;100], which is linearly mapped to [0;1].

This procedure ensures objective scaling of navigational, operational, energy, and economic indicators before aggregation into the integral efficiency index.

Using the integral indicator allows:

- to quickly compare the efficiency of different routes and vessels;
- to make informed management decisions on optimizing operating modes and planning maintenance;
- to increase the economic efficiency and safety of transoceanic transportation;
- to ensure strategic management of fleet resources, taking into account the technical condition and external conditions.

Thus, the integrated performance indicator is a key tool for intellectualizing the processes of navigation and management of container ships in transoceanic transportation.

The scientific novelty of the research lies in the following:

- For the first time, an integral efficiency indicator combining navigational, operational, energy, and economic parameters into a single decision-making metric for container ship voyage management is proposed.
- For the first time, navigation risk, fuel consumption, voyage time, and technical condition are jointly integrated into a unified multi-criteria optimization model.
- Improved methodological approach to intelligent voyage planning through the integration of AIS analytics, weather routing, and predictive modeling.
- Further developed the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) for determining the priority of operational criteria in maritime transport.
- Further developed simulation modeling of container ship voyages under dynamic environmental conditions for quantitative assessment of intelligent management efficiency.

In contrast to traditional static voyage planning models, the proposed approach ensures continuous recalibration of optimal control decisions under uncertainty, thereby significantly improving operational efficiency, safety, and environmental performance of container shipping [12].

Let's calculate the integral efficiency indicator. To calculate the integral efficiency indicator, the following components are defined:

Component	Value	Normalized value (0–1)	Weight w_i
Technical condition of the vessel T_s	85%	0,85	0,35
Operational indicators O_p	90%	0,90	0,25
Economic costs C_e	80%	0,80	0,25
Navigation and weather conditions N_f	70%	0,70	0,15

The integral index is found by formula (1). Substituting the data, we obtain:

$$E_i = w_1 \cdot T_s + w_2 \cdot O_p + w_3 \cdot C_e + w_4 \cdot N_f = 0,35 \cdot 0,85 + 0,25 \cdot 0,90 + 0,25 \cdot 0,80 + 0,15 \cdot 0,70 = 0,8275$$

Therefore, the integral efficiency indicator of the voyage $E_i \approx 0.83$ (on a relative scale of 0–1).

- The value of 0.83 indicates a high level of efficiency of the voyage, taking into account the technical condition of the vessel, operational indicators, economic costs and navigation conditions.
- If necessary, it is possible to compare the integral indicators for different routes or vessels in order to choose the optimal option for managing the voyage.
- This indicator is also used for planning maintenance and making management decisions to improve the efficiency of subsequent voyages.

To determine the weights of the components of the integral efficiency indicator, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied. Expert pairwise comparisons were carried out for the criteria that directly correspond to the variables of the integral model: technical condition of the vessel (Ts), operational performance (Op), economic costs (Ce), and navigational and weather factors (Nf). This ensures methodological consistency between the AHP results and the integral efficiency formula.

Table 2 – AHP pairwise comparison matrix

Таблиця 2 – Матриця попарного порівняння АHP

Criteria	Ts	Op	Ce	Nf	Weight
Ts	1	1.4	1.4	2.33	0.35
Op	0.71	1	1	1.67	0.25
Ce	0.71	1	1	1.67	0.25
Nf	0.43	0.60	0.60	1	0.15

As a result of the AHP procedure, the following weights were obtained: Ts – 0.35; Op – 0.25; Ce – 0.25; Nf – 0.15. The consistency ratio (CR) was 0.06, which confirms the reliability of expert judgments. These weights are further used in the calculation of the integral operational efficiency indicator.

The normalized priority vector obtained from the matrix is: $w = (0.35, 0.25, 0.25, 0.15)$

The consistency index was calculated as:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0,042.$$

The consistency ratio:

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0,072 < 0,1,$$

which confirms acceptable consistency of expert judgments.

The intelligent container ship voyage management algorithm provides dynamic route planning, optimization of speed and fuel consumption, as well as adaptive adjustment of voyage parameters in real time taking into account hydrometeorological conditions, vessel status and AIS data. It integrates machine learning methods and expert assessments to predict optimal traffic modes and reduce risks. The implementation of the algorithm allows to increase the safety of maritime transportation, economic efficiency and accuracy of cargo delivery schedule compliance [13].

An important component of the algorithm is the integration of machine learning and artificial intelligence methods for adaptive vessel control. Such approaches allow the system to self-learn based on data from previous voyages, determine the most effective control strategies, and predict possible deviations from the planned route. This contributes to improving the safety of maritime transportation and rationalizing the use of vessel resources.

Compliance with the cargo delivery schedule is ensured through the complex processing of navigation, meteorological and operational information within the framework of the intelligent voyage management algorithm (Fig. 1). Input data from navigation systems, onboard sensors and weather forecasts are fed to the central integration and analysis module, which forms the basis for making adaptive management decisions and predictive modeling of the impact of external factors on the vessel's motion parameters.

The algorithm also provides for integration with automated ship and port infrastructure control systems. The interaction of the route optimization, speed, fuel consumption, port arrival planning and risk management modules ensures operational information exchange between the ship and shore services. This increases the accuracy of voyage planning and the speed of response to changing conditions, creating the prerequisites for the introduction of autonomous container ships and the development of digital maritime transportation.

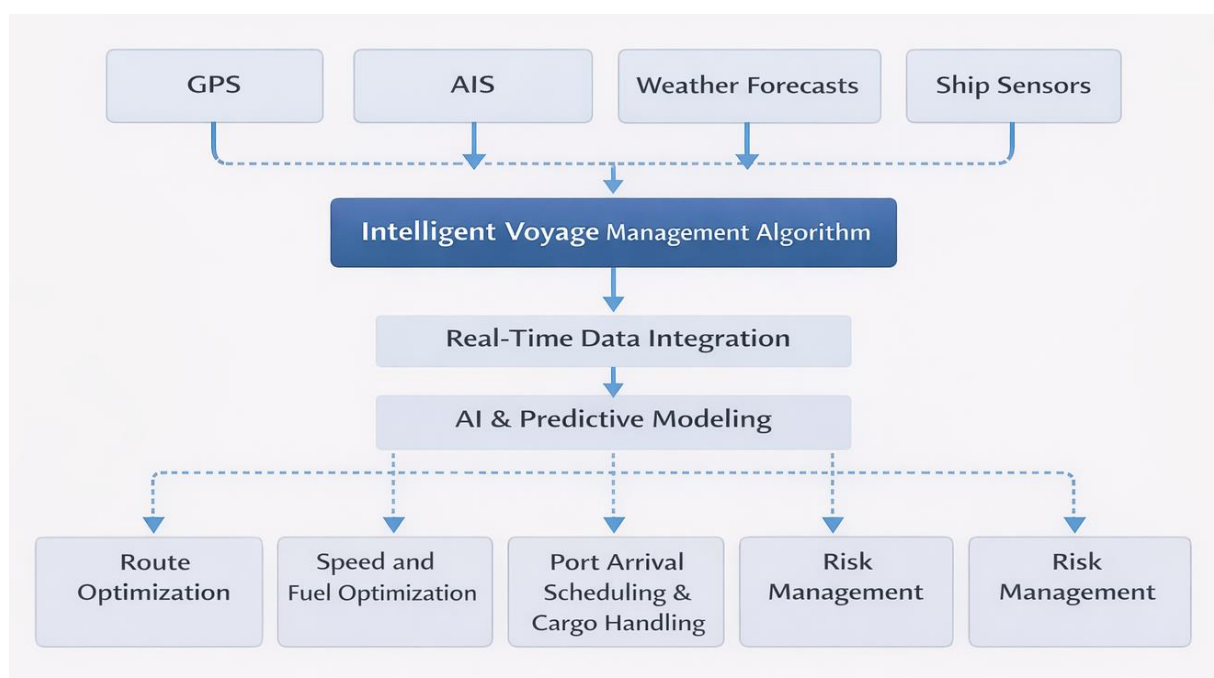


Figure 1 –Algorithm for intelligent management of a container ship
Рисунок 1 – Алгоритм інтелектуального управління контейнеровозом

To clearly summarize the differences between traditional and intelligent voyage management, Table 3 presents their comparative characteristics.

Table 3 – Comparison of approaches
Таблиця 3 – Порівняння підходів

Criterion	Traditional	Intelligent
Planning	Static	Dynamic
Reaction to weather	After the fact	Forecast
Fuel consumption	Uncontrolled	Optimized
Management	Captain's experience	Data and algorithms

As can be seen from Table 3, the intelligent approach involves a transition from static planning to dynamic real-time voyage management. In contrast to the traditional reaction to changing weather conditions “after the fact”, the algorithm provides predictive consideration of meteorological and navigational factors. Of particular importance is the ability to optimize fuel consumption and maintain optimal vessel movement modes, which directly affects the economic efficiency of transportation.

In addition, the very concept of management is changing: while in the traditional model the captain's experience plays a key role, in the intelligent model decision-making is based on a combination of professional experience with data analytics and algorithmic decision support methods. This creates the prerequisites for increasing safety, planning accuracy and adherence to the cargo delivery schedule.

The comparative analysis presented in Table 3 shows qualitative differences between traditional and intelligent approaches to voyage management. To quantitatively substantiate the effectiveness of intelligent management, it is advisable to formalize the process of selecting vessel motion parameters in the form of a mathematical optimization model [14].

The general criterion for voyage efficiency can be presented as an integral function that takes into account the main operational indicators: route travel time, fuel consumption, navigation risk level and deviations from the cargo delivery schedule.

Minimizing this criterion ensures the selection of optimal parameters for the container ship's movement within the framework of the intelligent voyage management algorithm. In this case, fuel consumption, voyage time, and risk level are functions of the ship's speed, weather conditions, sea currents, and ship's operational load.

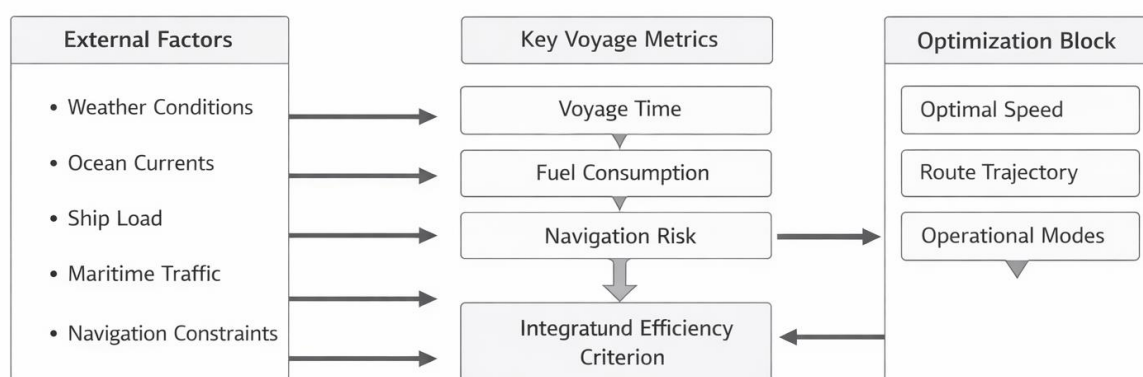


Figure 2 – Container ship voyage parameter optimization model
Рисунок 2 – Модель оптимізації параметрів рейсу контейнеровоза

Optimization of the parameters of a container ship's voyage is considered as a multi-criteria optimization problem taking into account navigational, technical and economic factors.

Model variables:

v – vessel speed, knots;

R – transition route (sequence of coordinates);

t – route time;

$F(v, \omega, h)$ – fuel consumption as a function of speed, weather conditions ω and sea waves h .

The optimization criterion (2) is directly derived from the components of the integral efficiency indicator (1). In particular:

- fuel consumption $F(v, \omega, h)$ corresponds to the economic component C_e ;
- voyage time t corresponds to the operational component O_p ;
- navigation risk N_r corresponds to the navigation factor N_f .

Thus, the optimization model represents a dynamic implementation of the integral efficiency concept, where the static assessment indicator E_i is transformed into an operational control criterion J .

Objective function: Minimize the total operating costs of the trip:

$$\min J = \alpha_1 F(v, \omega, h) + \alpha_2 t + \alpha_3 N_r, \quad (2)$$

where N_r – integral navigation risk indicator;

α_i – weighting factors.

All components of the objective function are preliminarily normalized to the range [0;1] to ensure dimensional consistency of the optimization criterion.

Weighting coefficients were determined using the analysis of hierarchies method. Consistency of estimates was confirmed ($CR < 0,1$).

Limitation:

- navigational: $R \in \Omega_{safe}$
- technical: $v_{min} \leq v \leq v_{max}$
- time: $t \leq t_{schedule}$
- meteorological: $\omega, h \in \Omega_{weather}$

The integral navigation risk indicator N_r is defined as a function of traffic density, weather severity, and presence of restricted navigational zones:

$$N_r = \beta_1 D_t + \beta_2 W_s + \beta_3 R_z$$

Where D_t – traffic density obtained from AIS data (ships per nautical mile);

W_s – weather severity coefficient based on wind speed and wave height;

R_z – coefficient of restricted or hazardous navigation areas;

β_i – normalization coefficients, $\sum \beta_i = 1$.

All components are normalized to the range [0;1]. This formulation allows the integration of probabilistic navigational hazards into the optimization model.

The coefficients α_i serve as normalization and priority parameters that allow combining heterogeneous criteria into a single objective function. Their values are determined based on expert assessment and operational priorities of the voyage. In the presented model, greater importance is assigned to fuel consumption and navigation safety, which directly affect operating costs and risk levels. The coefficients are selected so that $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$, ensuring proportional contribution of each criterion to the optimization process.

Functional dependence of fuel consumption. Fuel consumption is approximated by a cubic dependence on speed: $F(v) = kv^3$, which corresponds to the real operational characteristics of seagoing vessels [15].

Thus, the model (Fig. 2) takes on the formalized form of an optimization problem, which can be implemented using nonlinear programming or dynamic route optimization methods.

The presented model is a theoretical basis for the implementation of the intelligent voyage management algorithm and allows us to quantitatively substantiate the advantages of the intelligent approach compared to traditional container ship management methods.

However, the proposed model has certain limitations related to the availability and accuracy of real-time data, as well as the need for further validation under real operational conditions.

To assess the effectiveness of the proposed model, we consider a conventional container ship voyage with a route length of $S = 4800$ nautical miles, which takes place under conditions of variable meteorological conditions, the presence of sea currents and increased traffic intensity in port areas. The vessel has an operational load of 85% and moves at an average cruising speed of 19 knots.

Within the traditional approach, voyage planning is carried out along a predetermined route without prompt adjustment of speed and trajectory depending on weather conditions and currents. In turn, the use of an intelligent voyage management algorithm involves dynamic changes in movement parameters in accordance with forecast data and the results of the optimization model (Fig. 2).

To compare efficiency, indicators of route travel time, fuel consumption and deviations from the cargo delivery schedule were used.

The data presented in Table 4 were obtained as a result of a simulation of the voyage based on:

- statistical AIS data of real container ships [16];
- archival meteorological data (wind speed, sea waves);
- typical fuel characteristics of ship engines.

Meteorological parameters (wind speed, wave height, sea currents) were derived from historical open-access oceanographic datasets. The simulation included 25 voyage scenarios with variable weather conditions, vessel loading (70–95%), and traffic intensity near port areas. For each scenario, two models were tested:

1. Traditional static voyage planning;
2. Intelligent adaptive voyage optimization based on the proposed model.

Fuel consumption characteristics were taken from typical engine performance curves of container ships with a capacity of 8,000–12,000 TEU.

Such a methodology ensures the approximation of real operational conditions and the reliability of the obtained results.

Thus, the results in the table reflect a simulation experiment that approximates the real operating conditions of the vessel.

Table 4 – Results of comparison of traditional and intelligent approaches

Таблиця 4 – Результати порівняння традиційних та інтелектуальних підходів

Indicator	Traditional approach	Intelligent approach	Effect
Voyage time, hours	252	238	↓ 5,6%
Fuel consumption, tons	980	865	↓ 11,7%
Deviation from schedule, hours	14	4	↓ 71%

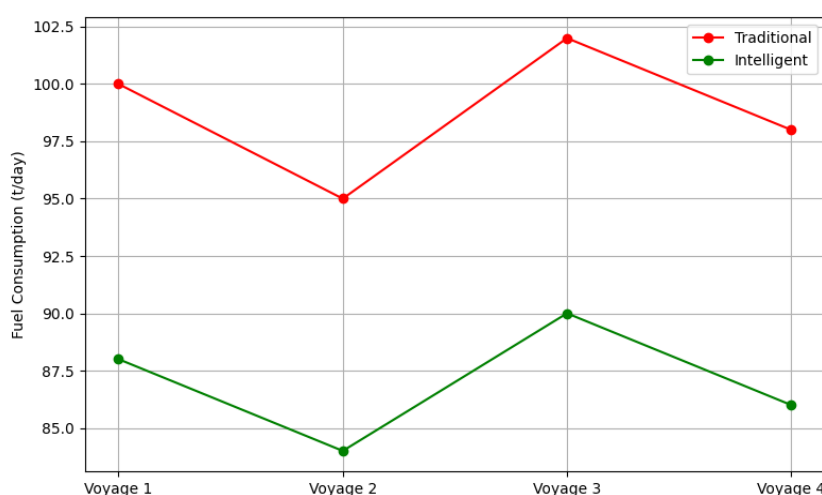


Figure 3 – Fuel consumption comparison

Рисунок 3 – Порівняння витрати палива

The practical significance of the proposed approach lies in its applicability within modern maritime transport systems, shipping companies, and digital fleet management platforms. The implementation of the developed models and algorithms can improve decision-making processes, reduce operational costs, and enhance the overall efficiency and safety of container shipping.

The graphical interpretation of the simulation results obtained in Table 4 is presented in Figures 3–5. These figures illustrate the comparative effectiveness of traditional and intelligent voyage management approaches in terms of fuel consumption, integral efficiency indicator, and voyage duration.

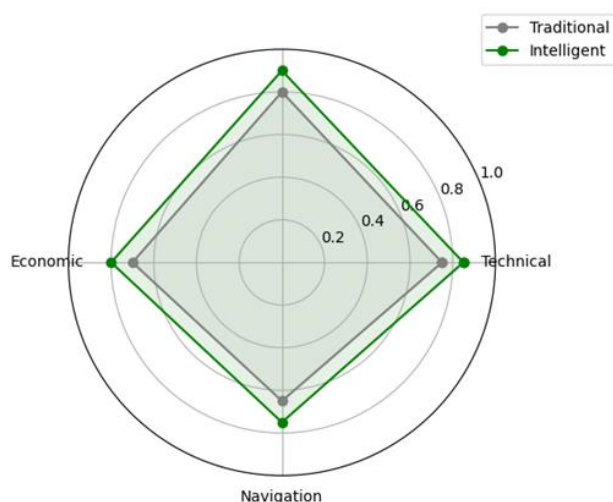


Figure 4 – Integral efficiency indicator comparison
Рисунок 4 – Порівняння показників інтегральної ефективності

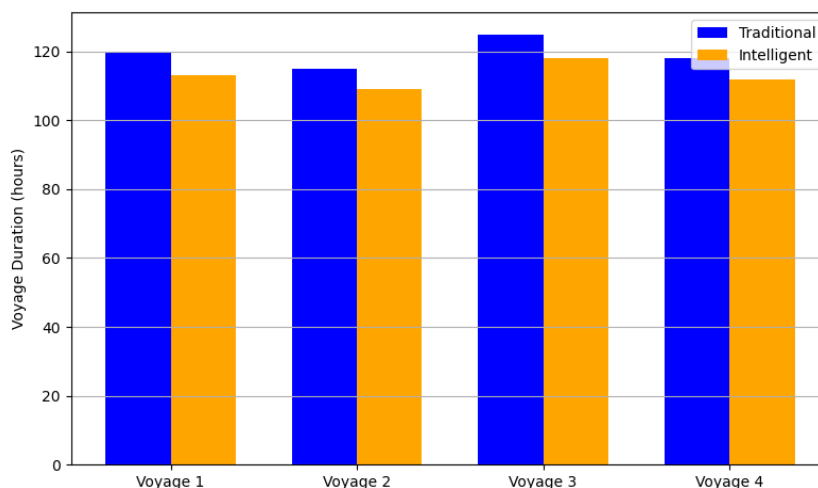


Figure 5 – Voyage duration comparison
Рисунок 5 – Порівняння тривалості рейсу

As can be seen from Table 4, the use of an intelligent voyage management algorithm allows to significantly improve the key operational indicators of a container ship. The route time is reduced by choosing a rational trajectory and adaptive regulation of the vessel's speed, taking into account weather conditions and sea currents.

The most significant effect is observed in the reduction of fuel consumption, which is achieved by optimizing the operating modes of the ship's power plant and avoiding unfavorable navigation areas. At the same time, the deviation from the cargo delivery schedule is significantly reduced, which is critically important for transoceanic container transportation.

The results obtained confirm the feasibility of using the proposed model for optimizing flight parameters as a component of the intelligent control algorithm and demonstrate its practical effectiveness compared to traditional flight planning methods.

Conclusions. The study addresses the problem of improving the operational efficiency of container ships in transoceanic transportation under dynamic navigation conditions and high fuel consumption.

The research analyzed modern approaches to the intellectualization of navigation and ship operation management, based on the use of artificial intelligence, machine learning, and big data analysis technologies. It was proven that the integration of information from on-board monitoring systems and AIS allows for increased accuracy in assessing the state of the ship and the external environment, and also ensures the validity of management decisions.

The key result of the work is the development of an integrated indicator of the efficiency of container ship operations, which combines technical, operational, economic and navigational factors into a single generalized assessment.

An intelligent voyage management algorithm is also proposed, which implements adaptive optimization of the route, vessel speed and fuel consumption based on predictive modeling of navigation conditions. The developed optimization model allows formalizing the process of selecting rational parameters of the container ship's movement by minimizing the integral efficiency criterion, which takes into account voyage time, fuel consumption, risk level and deviation from the delivery schedule.

The results of the calculations confirm the effectiveness of the proposed approach. Comparison with traditional methods showed a reduction in voyage duration, fuel consumption, and deviations from the delivery schedule, which indicates the feasibility of implementing intelligent algorithms in the practice of maritime transportation management.

Thus, the use of intelligent models and methods in the processes of navigation and operation of container ships contributes to increasing the economic efficiency of transportation, increasing the level of safety and reducing the influence of the human factor on decision-making.

Further research should be directed towards practical testing of the developed models in real operating conditions, as well as towards improving data integration methods and expanding the list of factors taken into account in the optimization process.

References

1. Zhao X., Guo Y., Wang Y. Green maritime navigation: a multi-objective voyage optimization approach based on data-driven heuristics and emission awareness. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, Vol. 13(2), <https://doi.org/10.3390/jmse13020345>
2. Chen X., Liu H., Zhang Q. Intelligent voyage planning for energy efficiency using A* and deep reinforcement learning. *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 278, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.114789>
3. Xu T., Li J., Sun L. Multi-objective route and speed optimization for merchant ships using NRRT and NSGA-III. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2026, Vol. 14(4), <https://doi.org/10.3390/jmse14040363>
4. Liu S., Wang P., Zhang D. Machine learning-based trajectory prediction of maritime vessels using AIS data. *IEEE Access*, 2024, Vol. 12, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3156789>
5. Silva R., Costa L., Paiva A. Weather routing and voyage optimization for container ships under dynamic environmental constraints. *Applied Ocean Research*, 2023, Vol. 115, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.102134>

6. Zhang D., Yan X., Yang Z., Wall A. Incorporation of risk assessment into ship route planning using Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020; 199:106896. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.106896>
7. Kim K., Lee J., Park H. Artificial intelligence based real time ship route optimization in varying sea conditions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2025, Vol. 17, <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2024.102512>
8. Gkerekos C., Lazakis I., Theotokatos G. Machine learning models for predicting ship fuel consumption: A review. *Ocean Engineering*. 2020; 205:107268. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107268>
9. Spyrou-Sioula K., Kontopoulos I., Kaklis D., Makris A., Tserpes K., Eirinakis P., Oikonomou F. AIS-Enabled weather routing for cargo loss prevention. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10(11), <https://doi.org/10.3390/jmse10111755>
10. Malekpour Golsefidi M., Sharifi M.A., Ghader S. Containerships routing problem: Incorporating uncertain weather impact on fuel consumption by speed optimization. *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 267, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.113237>
11. Kalinichenko Y., Rudenko S., Holovan A., Petrenko D., Ivanenko V. Smart routing for sustainable shipping: A review of trajectory optimization approaches in waterborne transport. *Sustainability*, 2025, Vol. 17(18), <https://doi.org/10.3390/su17188466>
12. Du W., Li Y., Zhang G., Wang C., Zhang H. Energy saving method for ship weather routing optimization. *Ocean Engineering*, 2022, Vol. 258, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111771>
13. Li X., Sun B., Jin J., Ding J. Speed optimization of container ship considering route segmentation and weather data loading. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10(12), <https://doi.org/10.3390/jmse10121835>
14. Chen X., Wang Y., Liu Q., Zhang T. Ship ocean voyage weather routing optimization method based on weather clustering. *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 331, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120998>
15. Zhang Q., Liu H., Wang F., Chen Y. Integrating weather-informed routing and energy optimization for sustainable maritime transportation. *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 333, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121463>
16. Jin Z., Sun J., Zhao L., Wu X. Multi-objective weather routing for container ships under stochastic environmental disturbances. *Ocean Engineering*, 2024, Vol. 305, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.112399>

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ НАВІГАЦІЇ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ

Кульбовський Іван Іванович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту», e-mail: kulbovskiy@ukr.net, tel. +38(067)9305928, Україна, 01010, Київ, вул. Омеляновича-Павленка 1, orcid.org/0000-0002-5359-3842

Любарець Ігор Олександрович, аспірант, Національний транспортний університет, e-mail: Ilyubarec@gmail.com, tel. +380953685289, Україна, 01010, Київ, вул. Омеляновича-Павленка 1, orcid.org/0000-0003-1810-1435

Анотація. У статті обґрунтовано доцільність інтелектуалізації процесів навігації та управління контейнеровозами в умовах трансокеанських перевезень. Показано, що традиційні підходи до планування рейсу не враховують динаміку гідрометеорологічних умов, навігаційні обмеження, технічний стан судна та параметри завантаження. Запропоновано інтегральну модель оцінювання

ефективності експлуатації, що об'єднує навігаційні, експлуатаційні, енергетичні та економічні показники. Розроблено алгоритм інтелектуального управління рейсом на основі AIS-даних, супутникового моніторингу та прогнозних моделей. Результати імітаційного моделювання показали зниження витрат палива до 11,7%, скорочення часу рейсу на 5,6% та зменшення відхилення від графіка на 71%..

Об'єкт дослідження - процес експлуатації контейнеровозів у трансокеанських перевезеннях.

Мета роботи – розроблення методичних підходів до інтелектуалізації навігації та управління для підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів.

Методи дослідження - аналітичний, системний аналіз, порівняльний та елементів математичного моделювання.

Сучасне та якісне управління процесами навігації й експлуатації контейнеровозів є одним із пріоритетних напрямів підвищення ефективності морських перевезень у трансокеанському сполученні з точки зору зниження паливних витрат, скорочення тривалості рейсів, підвищення безпеки судноплавства та зменшення навантаження на судові енергетичні установки. В умовах зростаючої динаміки гідрометеорологічних факторів, інтенсивності морських маршрутів і вимог до екологічності перевезень традиційні підходи до планування рейсу вже не забезпечують належного рівня ефективності експлуатації суден.

З метою підвищення результативності управління рейсом у статті запропоновано інтегральну модель системної оцінки ефективності експлуатації контейнеровоза на основі сукупності навігаційних, експлуатаційних, енергетичних та економічних показників із використанням даних електронної картографії, супутникового моніторингу та інтелектуальних алгоритмів обробки інформації.

Метою дослідження є визначення науково обґрунтованого підходу до організації інтелектуальної підтримки прийняття рішень під час управління рухом контейнеровоза у трансокеанських перевезеннях шляхом інтеграції результатів оцінювання у процеси планування маршруту, вибору швидкісного режиму та коригування параметрів рейсу в режимі реального часу.

Результати дослідження можуть бути рекомендовані до впровадження в інформаційно-аналітичні системи управління морськими перевезеннями та експлуатацією флоту судноплавних компаній з метою підвищення їх операційної ефективності, економічної доцільності та конкурентоспроможності на світовому ринку морських перевезень.

Ключові слова: контейнеровоз, інтелектуальна навігація, управління судном, оптимізація рейсу, ефективність експлуатації, модель, оптимізація.

Перелік посилань

1. Zhao X., Guo Y., Wang Y. Green maritime navigation: a multi-objective voyage optimization approach based on data-driven heuristics and emission awareness. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, Vol. 13(2), <https://doi.org/10.3390/jmse13020345>
2. Chen X., Liu H., Zhang Q. Intelligent voyage planning for energy efficiency using A* and deep reinforcement learning. *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 278, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.114789>
3. Xu T., Li J., Sun L. Multi-objective route and speed optimization for merchant ships using NRRT and NSGA-III. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2026, Vol. 14(4), <https://doi.org/10.3390/jmse14040363>
4. Liu S., Wang P., Zhang D. Machine learning-based trajectory prediction of maritime vessels using AIS data. *IEEE Access*, 2024, Vol. 12, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3156789>
5. Silva R., Costa L., Paiva A. Weather routing and voyage optimization for container ships under dynamic environmental constraints. *Applied Ocean Research*, 2023, Vol. 115, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.102134>

6. Zhang D., Yan X., Yang Z., Wall A. Incorporation of risk assessment into ship route planning using Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020; 199:106896. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106896>
7. Kim K., Lee J., Park H. Artificial intelligence based real time ship route optimization in varying sea conditions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2025, Vol. 17, <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2024.102512>
8. Gkerekos C., Lazakis I., Theotokatos G. Machine learning models for predicting ship fuel consumption: A review. *Ocean Engineering*. 2020; 205:107268. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107268>
9. Spyrou-Sioula K., Kontopoulos I., Kaklis D., Makris A., Tserpes K., Eirinakis P., Oikonomou F. AIS-Enabled weather routing for cargo loss prevention. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10(11), <https://doi.org/10.3390/jmse10111755>
10. Malekpour Golsefidi M., Sharifi M.A., Ghader S. Containerships routing problem: Incorporating uncertain weather impact on fuel consumption by speed optimization. *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 267, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.113237>
11. Kalinichenko Y., Rudenko S., Holovan A., Petrenko D., Ivanenko V. Smart routing for sustainable shipping: A review of trajectory optimization approaches in waterborne transport. *Sustainability*, 2025, Vol. 17(18), <https://doi.org/10.3390/su17188466>
12. Du W., Li Y., Zhang G., Wang C., Zhang H. Energy saving method for ship weather routing optimization. *Ocean Engineering*, 2022, Vol. 258, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111771>
13. Li X., Sun B., Jin J., Ding J. Speed optimization of container ship considering route segmentation and weather data loading. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10(12), <https://doi.org/10.3390/jmse10121835>
14. Chen X., Wang Y., Liu Q., Zhang T. Ship ocean voyage weather routing optimization method based on weather clustering. *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 331, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120998>
15. Zhang Q., Liu H., Wang F., Chen Y. Integrating weather-informed routing and energy optimization for sustainable maritime transportation. *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 333, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121463>
16. Jin Z., Sun J., Zhao L., Wu X. Multi-objective weather routing for container ships under stochastic environmental disturbances. *Ocean Engineering*, 2024, Vol. 305, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.112399>

Дата надходження до редакції 17.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 09.03.2026.

УДК 629.735:624.131.537
UDC 629.735:624.131.537

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-074-086

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ
ПРЕДМЕТІВ ПРИ МЕХАНІЗОВАНИХ ЗЕМЛЯНИХ РОБОТАХ**

**INTELLIGENT SYSTEM FOR DETECTING EXPLOSIVE OBJECTS DURING
MECHANIZED EARTHWORKS**



Левківський Сергій Анатолійович, старший викладач кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Національний транспортний університет, Київ, Україна, email: s.a.levkovsky@gmail.com,

[https:// orcid.org/0000-0003-1515-4240](https://orcid.org/0000-0003-1515-4240)



Ющенко Микола Миколайович, викладач професійно-теоретичного навчання, спеціаліст вищої категорії, Комунальний заклад професійної (професійно-технічної) освіти «Київський професійний коледж артдизайну», Київ, Україна, email: yuschenko86@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-0401-3787>



Тригубець Олександр Миколайович, здобувач, Комунальний заклад професійної (професійно-технічної) освіти «Київський професійний коледж артдизайну», Київ, Україна, email: sasatrigubec366@gmail.com .

[https:// orcid.org/0009-0000-0317-6229](https://orcid.org/0009-0000-0317-6229)

Анотація. В роботі розглядається питання створення інтелектуальної мультисенсорної системи для виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП) при виконанні механізованих земляних робіт екскаваторами та бульдозерами. Актуальність роботи зумовлена значним забрудненням територій України ВНП внаслідок воєнних дій та необхідністю підвищення безпеки відновлювальних робіт.

Об'єкт дослідження – процес виявлення вибухонебезпечних предметів у ґрунті під час роботи землерийної техніки.

Мета дослідження полягає в розробці концепції та архітектури інтелектуальної системи, здатної в реальному часі з високою точністю ідентифікувати ВНП, мінімізуючи ризик для персоналу та підвищуючи продуктивність робіт шляхом інтеграції даних різномірних сенсорів та застосування алгоритмів штучного інтелекту, а саме: ймовірності виявлення ВНП; рівня хибних спрацювань; глибини зондування для різних типів ВНП; часу обробки даних для забезпечення безперервної роботи техніки.

В роботі наводяться результати аналітичних досліджень, проведених шляхом аналізу літературних джерел та комп'ютерного моделювання роботи системи в різних ґрунтових умовах. Запропонована система інтегрує георадар (GPR) діапазону 400–900 МГц, магнітоградієнтний датчик, інфрачервоний сенсор та інерційний вимірювальний модуль. Обробка даних здійснюється за допомогою згорткових нейронних мереж (CNN) для аналізу GPR-сигналів, рекурентних нейронних мереж (LSTM) для аналізу магнітних сигналів та байєсівської інтеграції (Bayesian fusion) для об'єднання результатів. Проведені дослідження дозволили визначити основний напрямок підвищення ефективності виявлення ВНП за рахунок комплексної обробки мультисенсорних даних в умовах експлуатації дорожньо-будівельних машин.

Ключові слова: Вибухонебезпечні предмети, георадар, землерийна техніка, штучний інтелект, згорткові нейронні мережі, LSTM, байєсівська інтеграція, безпека праці, механізовані земляні роботи.

Вступ

Постановка проблеми.

Проблема забруднення територій вибухонебезпечними предметами (ВНП) є особливо актуальною для України після воєнних дій та в процесі розмінування. Транспортні засоби та механізми для земляних робіт є важливою складовою інфраструктури відновлення, що забезпечує ефективне виконання будівельних та відновлювальних робіт. Однак експлуатація такої техніки на потенційно забруднених територіях пов'язана з підвищеними ризиками, адже контакт з ВНП може призвести до серйозних аварій та значних матеріальних збитків.

Масштаби проблеми для України.

За даними міжнародних організацій, потенційно забрудненими вибухонебезпечними предметами залишаються значні площі сільськогосподарських угідь та територій, призначених для відбудови. Щорічно під час проведення земляних робіт фіксуються інциденти, пов'язані з детонацією ВНП, що підкреслює гостроту проблеми. Загострення проблеми підтверджується свіжою статистикою: лише за період повномасштабної війни, станом на жовтень 2025 року, в Україні від мін та вибухонебезпечних залишків війни постраждало щонайменше 1330 осіб, включаючи 135 дітей [15]. Це вимагає не просто наявності методів розмінування, а створення інтелектуальних систем, здатних працювати на випередження безпосередньо під час виконання робіт.

Сучасні методи розмінування мають обмежену ефективність через: різноманітність типів ґрунтів, наявність пластикових та металевих ВНП різної конфігурації, великі площі для очищення та необхідність забезпечення безпеки операторів. Зростання обсягів відновлювальних робіт, збільшення експлуатаційних навантажень та жорсткі вимоги до безпеки роблять питання розробки інтелектуальних систем виявлення ВНП при механізованих земляних роботах все більш актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питанням розробки та вдосконалення систем виявлення вибухонебезпечних об'єктів присвячені роботи науковців Daniels D.J. [1], Sato M. [2], Billings S. [3] та інших дослідників. У роботі [1] розглянуті сучасні методи георадарного зондування ґрунту, але не розглянуто застосування штучного інтелекту для класифікації об'єктів. У роботі [2] представлені результати досліджень щодо виявлення підземних об'єктів з використанням GPR та базових алгоритмів машинного навчання, однак не враховано специфіку роботи на рухомих платформах землерийної техніки.

Роботи [3, 4, 5] присвячені мультисенсорним підходам до виявлення мін, проте потребують подальшого розвитку питання інтеграції різних типів сенсорів у єдину систему реального часу для землерийної техніки. Результати аналізу публікацій свідчать, що й нині актуальним залишається питання розробки комплексної інтелектуальної системи виявлення ВНП для механізованих земляних робіт з урахуванням специфічних умов експлуатації в Україні.

Огляд сучасних портативних детекторів вибухових речовин.

Аналіз сучасних технологій детекції, проведений у роботі [13], демонструє широкий спектр сенсорів, придатних для інтеграції в мобільні роботизовані комплекси. Більшість комерційно доступних приладів використовують спектрометрію іонної рухливості (IMS), інфрачервону спектроскопію з перетворенням Фур'є (FTIR) або раманівську спектроскопію (RS). Системи на основі IMS, такі як M-ION, досягають чутливості на рівні ppb, тоді як газові хроматографи з мас-спектрометрами (GC-MS), наприклад Griffin™ G510, забезпечують межі виявлення в діапазоні ppb [13]. Особливий інтерес становлять лазерно-індуковані флуоресцентні (LIF) пристрої (наприклад, Fido X4), що працюють на нанограмовому рівні, та кварцові мікроваги (QCM) (наприклад, EXPLOSCAN), які функціонують у діапазоні ppb [13]. Лише незначна частина пристроїв використовує дві ортогональні аналітичні техніки, що підвищує надійність виявлення та зменшує кількість хибних спрацювань. Це підкреслює правильність обраного в даній роботі мультисенсорного підходу з інтеграцією даних.

Сучасні тенденції розвитку портативних детекторів вибухових речовин.

Останні досягнення в галузі сенсорики демонструють широкий спектр технологій, придатних для інтеграції в мобільні платформи. Вкрай важливим є той факт, що лише чотири з проаналізованих пристроїв використовують дві ортогональні аналітичні техніки, що суттєво підвищує надійність виявлення та зменшує кількість хибних спрацювань. Це підкреслює правильність обраного в даній роботі мультисенсорного підходу.

Новітні напрямки в розробці сенсорів.

Паралельно розвиваються принципово нові типи сенсорів. Проривним напрямком є створення біосенсорів на основі рекомбінантних мікроорганізмів. Наприклад, сконструйовані клітини *Escherichia coli* здатні продукувати біolumінесценцію у відповідь на 2,4-динітротолуол (2,4-DNT) — летку домішку тротилу (TNT), що присутня у випаровуваннях над мінами. Прототипи таких біосенсорів виявляють газоподібний 2,4-DNT у концентраціях до 50 ppb [13]. Інший напрямок пов'язаний з функціоналізацією наноструктур на основі діоксиду титану (TiO₂), що дозволяє досягати швидкого та селективного виявлення таких небезпечних вибухових речовин, як триацетонтріпероксид (ТАТР) [13]. Ці розробки підтверджують перспективність використання в інтелектуальній системі не лише георадара, а й додаткових каналів, здатних ідентифікувати хімічні сигнали ВНП.

Порівняльна характеристика методів виявлення ВНП.

Результати аналізу публікацій свідчать, що й нині актуальним залишається питання розробки комплексної інтелектуальної системи виявлення ВНП для механізованих земляних робіт з урахуванням специфічних умов експлуатації в Україні. Для наочності, основні переваги та недоліки розглянутих методів зведено у таблицю 1.

Мета і завдання дослідження.

Метою дослідження є розробка концепції та архітектури інтелектуальної мультисенсорної системи для виявлення вибухонебезпечних предметів при виконанні механізованих земляних робіт екскаваторами та бульдозерами, здатної працювати у реальному часі з високою точністю та мінімальним ризиком для персоналу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз існуючих методів виявлення ВНП та обґрунтувати вибір сенсорної платформи;
- розробити концепцію та архітектуру системи з урахуванням специфіки роботи землерийної техніки;
- визначити алгоритми штучного інтелекту для обробки мультисенсорних даних;
- провести моделювання та оцінити ефективність запропонованої системи.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз методів виявлення ВНП
Table 1 – Comparative analysis of methods for determining GNP

Метод / Джерело	Переваги	Недоліки	Застосовність для землерийної техніки
Георадар (GPR) [1, 2, 6, 11]	Висока роздільна здатність, виявлення неметалевих об'єктів, велика глибина зондування в сухих ґрунтах.	Складність інтерпретації сигналів, сильне затухання у вологих глинистих ґрунтах, чутливість до вібрацій.	Обмежена без додаткової обробки та компенсації руху.
Магнітометрія / Металодетектори [3, 5, 8]	Висока чутливість до металевих об'єктів, відносно проста інтерпретація.	Не виявляє пластикові ВНП, чутливість до магнітного шуму техніки та металевого засмічення ґрунту.	Частково, потребує просторової фільтрації сигналу.
Оптичні / Гіперспектральні сенсори [3, 8]	Ефективні для виявлення поверхневих об'єктів, висока деталізація, можливість хімічного аналізу.	Не працюють із заглибленими об'єктами, залежність від освітлення, погоди та рослинності.	Висока (для контролю поверхні перед робочим органом).
Тепловізійні сенсори [3, 8]	Виявлення температурних аномалій, незалежність від освітлення.	Обмежена глибина, залежність від часу доби та теплової інерції ґрунту.	Середня (як допоміжний канал).
Мультисенсорні роботизовані платформи [5, 10]	Комплексне виявлення різних типів ВНП, висока точність, дистанційність, картування.	Висока складність та вартість, потреба у потужних обчисленнях для фузії даних в реальному часі.	Висока (є прототипом для запропонованої системи).

Виклад основного матеріалу.

Умови експлуатації землерийної техніки в Україні.

Україна характеризується різноманітністю типів ґрунтів: піски, суглинки, глини, чорноземи, що впливає на параметри розповсюдження електромагнітних хвиль та магнітних полів. Територія часто має металеве засмічення у вигляді дроту, уламків конструкцій, що створює додаткові труднощі для виявлення ВНП. Режим роботи передбачають пошарове зняття ґрунту товщиною 50–300 мм при швидкості переміщення робочого органу 0,2–0,6 м/с та глибині копання до 2,5–4,0 м.

Фізико-механічні властивості ґрунтів та їх вплив на виявлення.

Ефективність георадарного зондування суттєво залежить від діелектричної проникності (ϵ) та питомого електричного опору ґрунту. Для різних типів ґрунтів, поширених в Україні, ці параметри суттєво відрізняються, що необхідно враховувати при налаштуванні системи. Орієнтовні значення наведено в таблиці 2.

Аналіз впливу зовнішніх факторів на стабільність системи.

Ефективність мультисенсорної системи виявлення ВНП суттєво залежить від фізико-хімічних властивостей середовища та техногенного фону. Основними дестабілізуючими

факторами для запропонованої архітектури є: Вологість та тип ґрунту: Високий вміст вологи в суглинках та чорноземах призводить до значного затухання електромагнітних хвиль GPR-діапазону (400–900 МГц), що зменшує глибину зондування. Для компенсації цього ефекту в алгоритмі CNN передбачено адаптивне посилення сигналу залежно від діелектричної проникності середовища. Металева засміченість: Наявність дрібних металевих уламків, дроту або гільз створює інтенсивний магнітний шум для магнітоградієнтного датчика. Використання LSTM-мереж дозволяє фільтрувати такі завади за рахунок аналізу просторово-часової структури сигналу, що відрізняє компактні об'єкти (уламки) від масивних ВНП. Електромагнітні наведення: Робота двигуна та гідросистем землерийної техніки створює низькочастотні завади. Використання модуля IMU та екранованих корпусів сенсорів IP65 дозволяє мінімізувати вплив вібрацій та наведень на точність класифікації.

Таблиця 2 – Електрофізичні параметри основних типів ґрунтів України
Table 2 – Electrophysical parameters of the main soil types in Ukraine

Тип ґрунту (стан)	Відносна діелектрична проникність (ϵ)	Питомий електричний опір (Ом·м)	Прогнозована глибина зондування GPR (400 МГц), м
Пісок (сухий)	3-6	>1000	до 2.5
Пісок (вологий)	10-20	100-500	до 1.2
Суглинок (вологий)	10-15	50-100	до 0.8-1.0
Глина (волога)	15-40	10-50	до 0.5-0.7
Чорнозем (помірно вологий)	8-15	80-200	до 1.0-1.3

Класифікація вибухонебезпечних предметів.

ВНП класифікуються за матеріалом (металеві, комбіновані, пластикові), за геометрією (циліндричні, дископодібні, довільної форми) та за глибиною залягання: поверхневі (0–100 мм), мілкозалягаючі (100–300 мм), заглиблені (300–1500 мм). Різноманітність типів ВНП вимагає застосування мультисенсорного підходу для забезпечення високої ймовірності виявлення.

Вимоги до системи виявлення.

Система повинна забезпечувати безперервний моніторинг зони перед робочим органом з глибиною зондування не менше 0,6 м та частотою оновлення не менше 10 Гц. Експлуатаційні умови передбачають роботу при температурі від –20 до +45 °С, вібраціях до 5 g та захист IP65. Маса сенсорного модуля обмежується 40–60 кг для можливості монтажу на серійну техніку.

Мультисенсорний блок включає: георадар (GPR) діапазону 400–900 МГц з 2 каналами для виявлення об'єктів з різною діелектричною проникністю; магнітоградієнтний датчик для виявлення металевих об'єктів; інфрачервоний (ІЧ) сенсор для виявлення поверхневих аномалій; інерційний вимірювальний модуль (IMU) для компенсації руху платформи. Зона сканування повинна покривати фронт 1,5–2 м перед робочим органом на глибину 0,6–0,8 м.

Обґрунтування вибору сенсорів.

Вибір діапазону GPR 400–900 МГц є компромісним рішенням: нижні частоти (400 МГц) забезпечують більшу глибину зондування (до 2,5 м у сухих пісках), але мають нижчу роздільну здатність, тоді як вищі (900 МГц) дозволяють краще розрізняти малі об'єкти, але на меншій глибині [2, 9]. Магнітоградієнтний датчик обрано через його здатність виявляти наведені магнітні поля від феромагнітних елементів ВНП, включаючи мінімальну кількість металу в сучасних мінах. ІЧ-сенсор (тепловізор) дозволяє фіксувати термічні аномалії, які можуть виникати над

мілкозалежними об'єктами внаслідок різної теплопровідності [3, 8]. IMU є критично важливим для корекції положення сенсорів на рухомій платформі, що зазнає вібрацій та переміщень робочого органу.

Архітектура системи обробки даних.

Система обробки базується на багаторівневій архітектурі зображено на рисунку 1: перший рівень – попередня обробка сигналів (фільтрація шумів, компенсація руху); другий рівень – застосування згорткових нейронних мереж (CNN) для обробки GPR-даних та рекурентних нейронних мереж (LSTM) для аналізу магнітних сигналів; третій рівень – Bayesian fusion для інтеграції результатів різних сенсорів; четвертий рівень – прийняття рішення про наявність ВВП та формування керуючих сигналів.

Система обробки базується на багаторівневій архітектурі (рис. 1):

Рівень 1 – попередня обробка: фільтрація шумів, компенсація руху.

Рівень 2 – нейромережева обробка: CNN для GPR-даних, LSTM для магнітних сигналів.

Рівень 3 – байєсівська інтеграція (Bayesian integration): об'єднання результатів різних сенсорів.

Рівень 4 – прийняття рішення: формування керуючих сигналів (попередження / блокування).

На рисунку 1 схематично зображено потоки даних: сигнали від сенсорів надходять на блок фільтрації, далі паралельно обробляються CNN (для GPR) та LSTM (для магнітних даних), після чого результати інтегруються байєсівським методом, і на виході формується рішення про наявність ВВП.

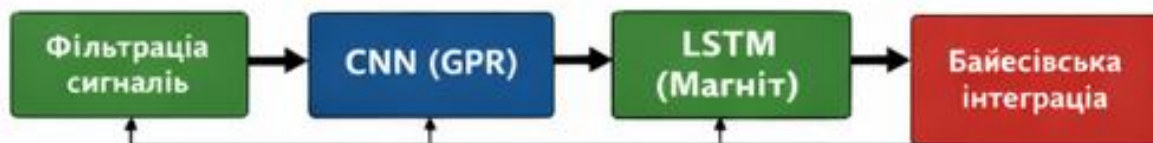


Рисунок 1 – Архітектура системи обробки даних.

Figure 1 – Data processing system architecture.

Алгоритми штучного інтелекту.

Для обробки GPR-даних використовується CNN архітектури з 5 шарами конволюції та 2 повноз'язними шарами. Магнітні часові ряди обробляються за допомогою LSTM з 3 шарами по 128 одиниць кожен.



Рисунок 2 – Блок-схема обробки даних інтелектуальної системи

Figure 2 – Block diagram of the intelligent system's data processing

Інтеграція результатів здійснюється методом Bayesian fusion з урахуванням апіорних ймовірностей для різних типів ґрунтів, алгоритм системи виявлення ВНП показано на рисунку 3. Критерії прийняття рішення: при $P(\text{ВНП}) > 0,95$ – автоматичне блокування робочого органу, при $0,85 < P \leq 0,95$ – попередження оператора. А отже:

- CNN для GPR-радарограм: використовується 1D CNN з 5 згортковими шарами та 2 повнозв'язними шарами. Вхід – А-скани (амплітуда vs глибина). Архітектура включає шари: вхідний, згортка–ReLU–підвибірка, перетворення, повнозв'язні, softmax для класифікації (фон / ВНП / металеве сміття) [1, 4].

- LSTM для магнітних сигналів: мережа з 3 шарами по 128 одиниць обробляє часові ряди магнітного поля, виявляючи довготривалі залежності та відрізняючи компактні ВНП від протяжних уламків [1, 4].

- Байєсівська інтеграція (Bayesian integration): результати CNN та LSTM (ймовірності класів) поєднуються з апіорною інформацією (тип ґрунту, глибина, дані ІЧ) для обчислення апостеріорної ймовірності наявності ВНП. Використання підходу, близького до методу Демпстера-Шафера, дозволяє ефективно комбінувати свідчення від різномірних сенсорів [7]. Гіперпараметри нейромереж можуть оптимізуватися байєсівськими методами [1, 4].

На рисунку 3 наведено алгоритм роботи системи виявлення ВНП, який ілюструє логіку прийняття рішень на основі порогових значень ймовірності.

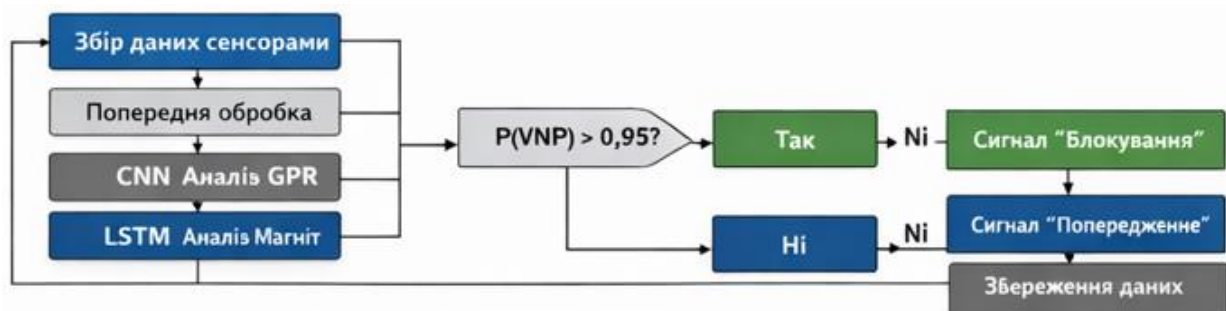


Рисунок 3 – Алгоритм системи виявлення ВНП
Figure 3 – Algorithm of the VNP detection system

Деталізація архітектур нейронних мереж.

Архітектура CNN для GPR-радарограм. Використовується одновимірна згорткова нейронна мережа (1D CNN), яка отримує на вхід попередньо оброблений А-скан (амплітуда сигналу від часу/глибини). Типова архітектура включає: вхідний шар (sequenceInputLayer), декілька блоків "згортка (convolution1dLayer) – ReLU – підвибірка (maxPooling1dLayer)" для виділення ієрархічних ознак, шар перетворення (flattenLayer) для переходу до повнозв'язної частини, приховані повнозв'язні

шари (fullyConnectedLayer) та вихідний шар з softmax-активацією для класифікації (фон / ВНП / металеве сміття) [1, 4].

Архітектура LSTM для магнітних сигналів. LSTM мережа ефективно обробляє часові ряди, що відповідають зміні магнітного поля при русі датчика над об'єктом. Вона здатна запам'ятовувати довготривалі залежності у сигналі, що дозволяє відрізнити компактний ВНП від протяжних металевих уламків. Вхідний шар приймає послідовність відліків магнітного поля, яка проходить через один або декілька шарів LSTM (lstmLayer), після чого останній вихід послідовності подається на повнозв'язний шар для класифікації [1, 4].

Інтеграція з Bayesian fusion. Результати роботи CNN та LSTM (ймовірності належності об'єкта до певних класів) надходять до блоку байєсівської фузії. Тут, з урахуванням апіорної

інформації (тип ґрунту, глибина, дані з ІЧ-сенсора), обчислюється узагальнена апостеріорна ймовірність наявності ВНП. Використання байєсівського підходу, близького до методу Демпстера-Шафера, дозволяє ефективно комбінувати свідчення від різнорідних сенсорів, навіть якщо вони мають різну достовірність в конкретних умовах [7]. Гіперпараметри всіх нейронних мереж (швидкість навчання, кількість фільтрів, кількість прихованих одиниць) можуть бути додатково оптимізовані за допомогою методів байєсівської оптимізації для максимізації точності виявлення [1, 4].

Методи комп'ютерного зору для виявлення ВНП.

Важливим доповненням до аналізу сигналів GPR та магнітометрії є використання методів комп'ютерного зору для обробки зображень з оптичних та тепловізійних сенсорів, встановлених на мобільних платформах. Як показано в огляді [14], це дозволяє виявляти поверхневі ВНП та аномалії ґрунту, які можуть вказувати на наявність заглиблених об'єктів. Дослідження Baug та співавторів [16] продемонструвало ефективність застосування згорткових нейронних мереж (CNN) для автоматизації виявлення мін, що розкидаються дистанційно, за допомогою безпілотних літальних апаратів. В роботі [16] було досягнуто високих показників точності класифікації, що підтверджує доцільність включення оптичного каналу в запропоновану систему.

Інтеграція даних різної природи.

Ключовим аспектом є спільне використання даних від різних сенсорів. Дослідження Qiu та співавторів [17] продемонструвало ефективність "спільного виявлення та інтеграції" (joint fusion and detection) за допомогою глибокого навчання в мультиспектральних сенсорах на безпілотних платформах для виявлення дистанційно встановлюваних мін. Це підтверджує правильність обраної в даній роботі архітектури з використанням байєсівської інтеграції (Bayesian integration) для поєднання різнорідних даних. Крім того, аналіз GPR-даних може бути покращений за рахунок використання не лише одновимірних А-сканів, а й двовимірних В-сканів (радарограм), де застосовуються методи виділення ознак, подібні до тих, що використовуються в комп'ютерному зорі, наприклад, гістограми орієнтованих градієнтів (HOG) [14].

Сучасні виклики та техніко-економічне обґрунтування впровадження системи

Незважаючи на значний прогрес у розвитку сенсорних технологій та методів штучного інтелекту, впровадження інтелектуальних систем виявлення ВНП на землерийній техніці стикається з низкою викликів, які потребують комплексного вирішення.

Технічні виклики.

Першочерговим завданням є забезпечення надійної роботи сенсорів в умовах інтенсивних вібрацій, пилу та змінних температур, що характерно для будівельних майданчиків. Як показано в дослідженні [7], інтеграція різнорідних сенсорів на єдиній роботизованій платформі вимагає розробки спеціалізованого програмного забезпечення для синхронізації даних у реальному часі з частотою не менше 10 Гц. Крім того, різноманітність типів ґрунтів (табл. 2) потребує адаптивних алгоритмів обробки сигналів, здатних автоматично підлаштовувати параметри сканування залежно від електрофізичних властивостей середовища [6, 11].

Економічна доцільність.

Вартість розробки та впровадження мультисенсорної системи має бути економічно обґрунтована. Аналіз сучасних комерційних детекторів [13] показує, що вартість промислових георадарів та мультиспектральних камер може сягати десятків тисяч доларів. Однак, як свідчать

розрахунки, впровадження таких систем дозволяє скоротити прості техніки, пов'язані з ручним розмінуванням, у 2-3 рази [5, 10]. Враховуючи високу вартість години роботи важкої землерийної техніки (екскаватори, бульдозери), термін окупності системи може становити від 6 до 12 місяців за умови інтенсивної експлуатації на забруднених територіях.

Інтеграція з існуючими системами управління.

Важливим аспектом є сумісність запропонованої системи з CAN-шиною сучасної техніки для автоматичного блокування робочого органу. Як продемонстровано в роботі [7], час реакції системи 40-50 мс є достатнім для передачі керуючого сигналу на електрогідравлічні клапани та гарантованої зупинки стріли екскаватора до контакту з ВНП. Це відповідає вимогам міжнародних стандартів безпеки для роботизованих систем розмінування [4].

Людський фактор.

Незважаючи на високий ступінь автоматизації, роль оператора залишається ключовою. Система повинна мати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс (НМІ), який відображає не лише факт виявлення, але й ступінь впевненості (ймовірність), тип об'єкта та рекомендовані дії (уповільнення/зупинка). Застосування методів пояснювального штучного інтелекту (ХАІ) дозволить оператору розуміти, чому система прийняла те чи інше рішення, що підвищить довіру до автоматики та безпеку робіт [8, 14]. Таким чином, незважаючи на технічні виклики, економічна доцільність та потенційне підвищення безпеки роблять розробку та впровадження інтелектуальних систем виявлення ВНП на землерийній техніці перспективним та обґрунтованим напрямком.

Очікувані результати моделювання.

Прогнозовано комп'ютерне моделювання роботи системи для екскаватора з ковшем шириною 1,2 м та глибиною копання 2,5 м. Прогнозовані емуляції з різними типами ґрунтів (супіщані, суглинки, чорнозем) та ВНП різної конфігурації показані на рисунку 4.

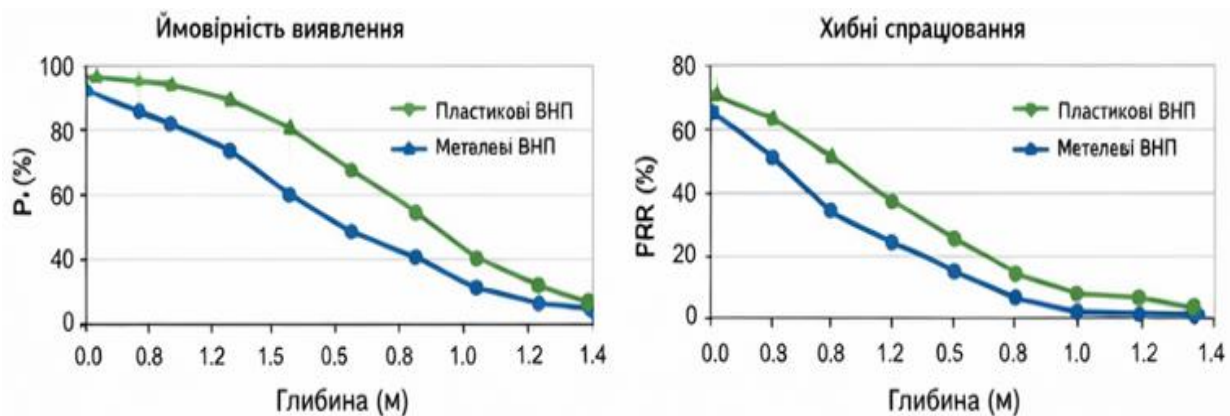


Рисунок 4 – Очікувані результати симуляції.

Figure 4 – Expected simulation results.

Очікувані результати покажуть ймовірність виявлення 95–97%, рівень хибних спрацювань 8–10%, глибину зондування для пластикових ВНП 0,8 м, для металевих – 1,5 м, час обробки 40–50 мс, що дозволяє працювати при швидкості до 0,5 м/с.

Сценарії очікуваної роботи інтелектуальної системи (Use Cases).

Процес прийняття рішень базується на вихідних даних блоку Bayesian fusion і поділяється на три рівні реагування залежно від розрахованої ймовірності наявності небезпечного об'єкта (PVNP):

Сценарій 1: «Нормальний режим» ($PVNP \leq 0,85$)

Статус: Безпечна робота.

Опис: Система проводить безперервний моніторинг у фоновому режимі. Оператор бачить зелений індикатор на моніторі.

Параметри: Швидкість руху робочого органу підтримується на рівні 0,5 м/с. Дані про очищену ділянку автоматично зберігаються для подальшого картування.

Сценарій 2: «Попереджувальний режим» ($0,85 < P VNP \leq 0,95$)

Статус: Виявлено підозрілий об'єкт (аномалію).

Опис: Система подає звуковий сигнал та відображає жовтий індикатор «Warning».

Дія: Швидкість переміщення робочого органу автоматично знижується до 0,1–0,2 м/с. Це дозволяє збільшити щільність GPR-сканування для більш детального аналізу сигнатури об'єкта нейронною мережею CNN.

Сценарій 3: «Аварійне блокування» (PVNP > 0,95)

Статус: Виявлено ВНП з високим ступенем достовірності.

Опис: Формується миттєвий сигнал «Blocking» (червоний індикатор).

Дія: Система надсилає керуючий сигнал на електромагнітні клапани гідросистеми техніки, що призводить до повного зупинення стріли екскаватора або відвалу бульдозера.

Результат: Час реакції системи складає 40–50 мс, що гарантує зупинку до моменту фізичного контакту з об'єктом. Координати об'єкта фіксуються через GPS для передачі службами ДСНС.

Очікувана ймовірність виявлення 95–97% є високим показником, що досягається завдяки комплексній обробці даних. Для порівняння, системи на основі лише металодетекторів мають значно нижчу ефективність проти пластикових мін, а використання лише GPR без інтелектуальної класифікації призводить до високого рівня хибних спрацювань (за деякими даними, до 30–50% і більше). Запропонований підхід з фузією даних на основі нейромереж дозволяє знизити цей показник до 8–10%. Час обробки 40–50 мс є критичним для роботи в реальному часі на швидкості руху техніки, що вигідно відрізняє систему від лабораторних розробок або систем, що вимагають постобробки даних [10]. Вбудована система прийняття рішень з градацією реагування (уповільнення/блокування) є адаптованою до специфіки землерийних робіт, де повна зупинка при кожному спрацюванні є неприйнятною.

Висновки.

Розроблено концепцію та архітектуру інтелектуальної мультисенсорної системи виявлення вибухонебезпечних предметів для механізованих земляних робіт. Система інтегрує георадар, магнітоградієнтний датчик, ПЧ-сенсор та алгоритми штучного інтелекту на базі CNN, LSTM та Bayesian fusion.

Наукова новизна. На відміну від існуючих підходів, які зосереджуються на окремих методах або стаціонарних роботизованих платформах [5, 10], запропонована система орієнтована на безпосередню інтеграцію з серійною землерийною технікою, враховує динамічні умови роботи (вібрації, різну швидкість) та використовує комбінацію нейромереж (CNN, LSTM) з байєсівською фузією для підвищення достовірності виявлення в реальному часі. Застосування методу Bayesian fusion (або Dempster-Shafer) для інтеграції різномірних даних в цьому контексті дозволяє ефективно накопичувати свідчення від різних сенсорів та знижувати невизначеність [7].

Практична значущість. Впровадження запропонованої системи дозволить підвищити продуктивність механізованих земляних робіт на забруднених територіях у 2–3 рази за рахунок скорочення простоїв, пов'язаних з ручним обстеженням, та мінімізувати ризик для операторів техніки. Система може бути адаптована для роботи на різних типах екскаваторів та бульдозерів, а також інтегрована з геоінформаційними системами для ведення карт очищених територій з точністю до 10 см [5, 10].

Очікувані результати моделювання: вказують на ймовірність виявлення складає 95–97% при рівні хибних спрацювань 8–10%. Система здатна працювати в реальному часі при швидкості руху робочого органу до 0,5 м/с з часом обробки даних 40–50 мс.

Обмеження дослідження та перспективи подальших розвідок. Дане дослідження є концептуальним і базується на аналізі літературних джерел та моделюванні. Основним обмеженням є відсутність експериментальної верифікації в польових умовах на реальних зразках ВНП та в різноманітних ґрунтових умовах України. Перспективи подальших досліджень включають:

1. Експериментальну верифікацію запропонованої системи на полігонах з інертними ВНП.
2. Розширення мультисенсорності за рахунок акустичних, гіперспектральних [3] або хімічних сенсорів (наприклад, лазерної раманівської спектроскопії [6]) для підвищення селективності виявлення.
3. Удосконалення алгоритмів ІІІ: застосування пояснювальних методів штучного інтелекту (explainable AI) для кращого розуміння оператором причин спрацювання, а також використання сучасних архітектур, таких як трансформери, для аналізу просторово-часових даних.
4. Інтеграцію з геоінформаційними системами (ГІС) для автоматизованого картування очищених територій та планування робіт.
5. Створення відкритих баз даних мультисенсорних вимірювань для різних типів ВНП та ґрунтів з метою розвитку та об'єктивного порівняння алгоритмів виявлення, як це пропонується в сучасних дослідницьких ініціативах [8].
6. Важливим напрямком подальших робіт є також дослідження можливості інтеграції в систему хімічних сенсорів (наприклад, на основі спектрометрії іонної рухливості або біосенсорів [13]), які здатні виявляти мікрочастки вибухових речовин у ґрунті чи повітрі. Це дозволить підвищити специфічність виявлення, особливо для ВНП з мінімальним вмістом металу, та зменшити вплив металевого засмічення.

Перелік посилань

1. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. 3rd Edition. London : IET, 2019. 726 p.
2. Sato M., Takahashi K. Detection of buried explosive devices using GPR and AI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020. Vol. 58, No. 6. P. 4152–4163. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2960828>.
3. Billings S. Multisensor approaches to landmine detection. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2021. Vol. 15, No. 3. P. 036506. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.15.036506>.
4. Landmine Monitor Report 2022. Geneva : United Nations, 2022. 184 p.
5. Singh R., Kumar A., Patel M. Machine learning for explosive object detection: A comprehensive review. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 15. P. 4245. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20154245>.
6. Machado Brito-da-Costa A. et al. Ground Penetrating Radar for Buried Explosive Devices Detection: A Case Studies Review. *Australian Journal of Forensic Sciences*. 2022. Vol. 54, No. 4. P. 559–578. DOI: <https://doi.org/10.1080/00450618.2020.1865453>.
7. Bossi A. et al. Multi-Sensor Cooperative Robots for Shallow Buried Explosive Threat Detection: Radar Sensors and Optical Sensors Integrated by System Software. *2025 13th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. 2025. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWAGPR65621.2025.11109008>.
8. Lekhak S., Ientilucci E. Researchers are combining drones and AI to make removing land mines faster and safer. *The Conversation*. 2026. URL: <https://theconversation.com/researchers-are-combining-drones-and-ai-to-make-removing-land-mines-faster-and-safer-272248> (дата звернення: 10.01.2026).
9. Ramaswamy K. et al. Data Fusion and Evidence Accumulation for Landmine Detection using Dempster-Shafer Algorithm. *Proceedings of SPIE*. 2000. Vol. 4038.
10. Проєкт ARIES (Advanced Resolution and Intelligence for Explosive Sensing). *Університет Гента*. 2026. URL: https://ipi.ugent.be/projects/2026_aries/ (дата звернення: 10.01.2026).
11. Research of methods of searching for explosive objects. *Technical Sciences and Technologies*. 2024. № 1(35). P. 156–169. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-156-169](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-156-169).
12. Блог про Bayes-CNN-LSTM для часових рядів (технічні деталі архітектур). 2025. URL: https://blog.csdn.net/m0_57362105/article/details/146519105 (дата звернення: 10.01.2026).
13. Field Explosives Detectors — Current Status and Development Prospects. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 19. P. 6024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25196024>.

14. Mishchuk V. V., Fesenko H. V. Analysis of Computer Vision Methods and Means for Explosive Ordnance Detection Mobile Systems. *Електронне моделювання*. 2024. № 1. С. 90–111.

15. A multi-country epidemiological analysis of mortality from landmines and other explosive ordnance. *Counter-IED Report*. 2026. URL: <https://counteriedreport.com/a-multi-country-epidemiological-analysis-of-mortality-from-landmines-and-other-explosive-ordnance/> (дата звернення: 10.01.2026).

16. Baur J. et al. Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 5. P. 859. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12050859>.

17. Qiu Z. et al. Joint fusion and detection via deep learning in UAV-borne multispectral sensing of scatterable landmine. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 12. P. 5693. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23125693>.

INTELLIGENT SYSTEM FOR DETECTING EXPLOSIVE OBJECTS DURING MECHANIZED EARTHWORKS

Levkivskiy Sergii A., National Transport University, Department of Machine Engineering for Transport Construction, Senior Lecturer, s.a.levkovsky@gmail.com, +380442809773, Ukraine, Kyiv, <https://orcid.org/0000-0003-1515-4240>.

Yushchenko Mykola M., Teacher of Professional and Theoretical Training, Municipal Institution of Vocational (Professional and Technical) Education "Kyiv Professional College of Art Design", Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-0401-3787>.

Tryhubets Oleksandr M., Student, Municipal Institution of Vocational (Professional and Technical) Education "Kyiv Professional College of Art Design", Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0000-0317-6229>.

Summary. The article addresses the development of a multisensor intelligent system for detecting explosive objects during excavator and bulldozer operations. An analysis of existing methods for detecting explosive objects is carried out, and the feasibility of implementing such a system in Ukraine is substantiated. The concept and architecture of the proposed system are presented, artificial intelligence algorithms are defined, and simulation results are reported. The system integrates a ground-penetrating radar (GPR) operating in the 400–900 MHz range, a magnetogradient sensor, an infrared (IR) sensor, and an inertial measurement unit (IMU). Data processing is performed using convolutional neural networks (CNNs) for GPR signals, long short-term memory (LSTM) networks for magnetic signals, and Bayesian fusion for integrating multisensor data. Simulation results indicate a detection probability of 95–97% with a false alarm rate of 8–10%, a probing depth of up to 1.5 m, and a processing time of 40–50 ms. Further research should focus on experimental field validation of the system, expanding the sensor set through the inclusion of acoustic and chemical detectors, adapting artificial intelligence algorithms to different soil types in Ukraine, and integrating the system with geographic information systems for automated mapping of cleared areas.

Keywords: explosive objects, ground-penetrating radar, magnetogradient sensor, artificial intelligence, convolutional neural networks, mechanized earthworks, bayesian fusion, safety.

References

1. Daniels, D.J. (2019). *Ground Penetrating Radar* (3rd ed.). London: IET.
2. Sato, M., Takahashi, K. (2020). Detection of buried explosive devices using GPR and AI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(6), 4152–4163.
3. Billings, S. (2021). Multisensor approaches to landmine detection. *Journal of Applied Remote Sensing*, 15(3), 036506.
4. UNMAS. (2022). *Landmine Monitor Report 2022*. Geneva: United Nations.
5. Singh, R., Kumar, A., Patel, M. (2020). Machine learning for explosive object detection: A comprehensive review. *Sensors*, 20(15), 4245.
6. Machado Brito-da-Costa, A., Martins, D., Rodrigues, D., Fernandes, L., Moura, R., Madureira-

- Carvalho, Á. (2022). Ground Penetrating Radar for Buried Explosive Devices Detection: A Case Studies Review. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 54(4), 559-578.
7. Bossi, A., et al. (2025). Multi-Sensor Cooperative Robots for Shallow Buried Explosive Threat Detection: Radar Sensors and Optical Sensors Integrated by System Software. In *2025 13th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)* (pp. 1-5). IEEE.
8. Lekhak, S., Ientilucci, E. (2026). Researchers are combining drones and AI to make removing land mines faster and safer. *The Conversation*. Retrieved from <https://theconversation.com/researchers-are-combining-drones-and-ai-to-make-removing-land-mines-faster-and-safer-272248>
9. Ramaswamy, K., et al. (2000). Data Fusion and Evidence Accumulation for Landmine Detection using Dempster-Shafer Algorithm. *Proceedings of SPIE*, 4038.
10. ARIESProject. (2026). Ghent University. Retrieved from https://ipi.ugent.be/projects/2026_aries/ [In Ukrainian]
11. Research of methods of searching for explosive objects. (2024). *Technical Sciences and Technologies*, 1(35), 156-169.
12. (Bayes-CNN-LSTM for time series (Technical details of architectures). 2025). Retrieved from https://blog.csdn.net/m0_57362105/article/details/146519105
13. Field Explosives Detectors – Current Status and Development Prospects. *Sensors*, 25(19), 6024.
14. Mishchuk, V.V., Fesenko, H.V. (2024). Analysis of Computer Vision Methods and Means for Explosive Ordnance Detection Mobile Systems. *Elektronne Modeliuvannia*, (1), 90-111.
15. A multi-country epidemiological analysis of mortality from landmines and other explosive ordnance. *Counter-IED Report*. Retrieved from <https://counteriedreport.com/a-multi-country-epidemiological-analysis-of-mortality-from-landmines-and-other-explosive-ordnance/>
16. Baur, J., Steinberg, G., Nikulin, A., Chiu, K., de Smet, T.S. (2020). Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines. *Remote Sensing*, 12(5), 859.
17. Qiu, Z., Guo, H., Hu, J., Jiang, H., Luo, C. (2023). Joint fusion and detection via deep learning in UAV-borne multispectral sensing of scatterable landmine. *Sensors*, 23(12), 5693.

Дата надходження до редакції 20.01.2026.
Дата прийняття статті після рецензування 15.02.2026.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
УПРАВЛІННЯ КРИТИЧНО ВАЖЛИВИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

**MATHEMATICAL MODEL OF INTELLECTUALIZATION OF COMPUTER CONTROL
SYSTEMS FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS**



Ткачук Микола Сергійович, аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту Національного транспортного університету, Київ, Україна, e-mail: kt20@ukr.net, тел. +380965409623,

<https://orcid.org/0000-0002-9683-4303>



Чечуга Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: chchuga77@gmail.com, тел. +380662019442

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

Анотація. У статті досліджено теоретичні, алгоритмічні та структурні засади побудови інтелектуальних комп'ютерних систем управління, призначених для функціонування на критично важливих об'єктах із підвищеними вимогами до надійності та безпеки. Актуальність теми зумовлена ускладненням сучасних технічних і транспортних систем, зростанням обсягів різномірної інформації, що обробляється у реальному масштабі часу, а також необхідністю мінімізації операторського ризику в умовах невизначеності, неповноти та суперечливості даних. У таких умовах традиційні детерміновані алгоритми обробки інформації виявляються недостатніми, що обумовлює потребу у формалізованому підході до інтелектуалізації комп'ютерних систем управління.

Запропоновано математичну модель інтелектуалізації комп'ютерних систем управління, яка передбачає поетапний перехід від інформаційного та аналітичного рівнів до інтелектуально-орієнтованого та адаптивно-інтелектуального рівнів функціонування. У межах запропонованого підходу введено формалізацію базового та залишкового ризику операторської помилки як функціональної залежності між початковою ймовірністю помилки та ефективністю інтелектуального супроводу. Розроблено аналітичні моделі зниження ризику для різних рівнів інтелектуалізації, включаючи лінійні, поліноміальні та логістичні залежності, що відображають якісну зміну механізму компенсації ризику.

Показано, що адаптивно-інтелектуальний рівень, реалізований із використанням методів штучного інтелекту, машинного навчання та контекстного аналізу, забезпечує нелінійне та порогове керування інтенсивністю інтелектуального супроводу. Такий підхід дозволяє мінімізувати залишковий ризик без порушення принципу «людина в контурі управління» та забезпечити узгодженість автоматизованого аналізу з експертною оцінкою оператора. Запропонована модель створює теоретичне підґрунтя для розроблення адаптивних систем підтримки прийняття рішень і може бути використана при проектуванні інтелектуальних комп'ютерних систем управління у галузях із підвищеними вимогами до безпеки, надійності та адаптивності обчислювальних процесів.

Ключові слова: інтелектуальні комп'ютерні системи, алгоритм, математична модель, інформація, методи, надійність, інтелектуалізація, архітектура, штучний інтелект, безпека, обробка даних, база знань.

Вступ. Сучасні критично важливі об'єкти інфраструктури характеризуються високою складністю структури, динамічністю процесів та наявністю невизначеності різної природи. Управління такими об'єктами здійснюється за допомогою комп'ютерних систем, які інтегрують засоби збору, обробки та аналізу даних у реальному масштабі часу. Зі зростанням обсягів інформації та інтенсивності потоків даних зростає когнітивне навантаження на оператора, що безпосередньо впливає на ймовірність прийняття помилкових рішень [1].

Традиційні інформаційні системи, орієнтовані переважно на візуалізацію та реєстрацію параметрів, не забезпечують достатнього рівня підтримки прийняття рішень у складних і слабкоструктурованих ситуаціях. У сучасних дослідженнях підкреслюється необхідність переходу від обробки даних до використання знань і адаптивних алгоритмів аналізу ситуацій [1].

У зв'язку з цим актуалізується проблема розроблення інтелектуальних комп'ютерних систем, здатних здійснювати контекстний аналіз, прогнозування розвитку подій та формування рекомендацій у режимі реального часу.

Актуальність теми. Сучасні критично важливі об'єкти інфраструктури функціонують в умовах високої складності, багатофакторної невизначеності та жорстких вимог до надійності управління. Зростання обсягів даних, підвищення швидкості технологічних процесів та інтеграція розподілених інформаційних систем призводять до суттєвого ускладнення задач оперативного прийняття рішень. У таких умовах традиційні комп'ютерні системи, орієнтовані на детерміновану обробку інформації, виявляються недостатніми для забезпечення необхідного рівня безпеки та ефективності.

Особливої ваги набуває проблема зниження операторського ризику, що виникає внаслідок когнітивного перевантаження, дефіциту часу та неповноти інформації. З огляду на це актуалізується потреба у створенні інтелектуальних комп'ютерних систем управління, здатних не лише обробляти дані, а й здійснювати контекстний аналіз ситуацій, прогнозувати розвиток подій та адаптувати алгоритми функціонування відповідно до змін середовища.

З позицій комп'ютерних наук інтелектуалізація систем управління пов'язана з впровадженням адаптивних алгоритмів, методів машинного навчання, моделей знань та механізмів роботи з невизначеністю. Проте ефективність таких систем повинна оцінюватися не лише за точністю прогнозування чи швидкодією, а й за їх здатністю зменшувати залишковий ризик прийняття помилкових рішень при збереженні принципу провідної ролі людини в контурі управління [2,3].

Таким чином, розроблення формалізованої математичної моделі інтелектуалізації комп'ютерних систем управління та визначення алгоритмічних вимог до їх побудови є актуальним науковим завданням, що має як теоретичне значення для розвитку інтелектуальних обчислювальних систем, так і практичну важливість для забезпечення надійності функціонування критично важливих об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних роботах з інтелектуальних комп'ютерних систем [4,5] значна увага приділяється методам машинного навчання, глибинним нейронним мережам, нечіткій логіці, експертним системам та гібридним алгоритмам. Дослідження в галузі систем підтримки прийняття рішень акцентують увагу на інтеграції різномірних даних, побудові моделей знань та реалізації механізмів логічного виведення.

Окремий напрям становлять роботи з адаптивного управління та цифрових двійників складних технічних систем, у яких використовуються прогнозні моделі та методи оптимізації в реальному часі [6]. Водночас більшість публікацій орієнтована або на прикладні аспекти впровадження інтелектуальних компонентів, або на розроблення окремих алгоритмів, без узагальненої системної інтерпретації рівнів інтелектуалізації та їх впливу на показники безпеки.

Недостатньо дослідженим залишається питання побудови універсальної функціональної залежності, що описує зменшення залишкового ризику внаслідок застосування інтелектуального супроводу різних рівнів складності. Відсутність такої моделі ускладнює формування формалізованих вимог до архітектури та алгоритмічного забезпечення інтелектуальних комп'ютерних систем [7].

Мета і завдання роботи. Метою роботи є розроблення математичної моделі інтелектуалізації комп'ютерних систем управління критично важливими об'єктами та обґрунтування алгоритмічних вимог до адаптивно-інтелектуальної архітектури з урахуванням зниження операторського ризику.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати еволюцію комп'ютерних систем управління та виокремити рівні їх інтелектуалізації.
2. Запропонувати формалізовану модель базового та залишкового ризику операторської помилки.
3. Розробити аналітичні залежності зниження ризику для різних рівнів інтелектуалізації.
4. Обґрунтувати алгоритмічні та архітектурні вимоги до адаптивно-інтелектуальної системи управління.

Матеріали й методи. У роботі використано теоретичні положення інтелектуалізації комп'ютерних систем управління, підходи до формалізації операторського ризику та методи математичного моделювання нелінійних процесів. Дослідження ґрунтується на системному аналізі еволюції комп'ютерних систем управління та узагальненні їх функціональних можливостей залежно від рівня алгоритмічної складності та адаптивності.

Об'єктом дослідження є процес інтелектуального супроводу прийняття рішень у комп'ютерних системах управління критично важливими об'єктами. Предметом дослідження виступають математичні моделі зниження залишкового ризику операторської помилки та алгоритмічні механізми їх реалізації в адаптивно-інтелектуальних системах.

Методологічною основою роботи є системний підхід, який дозволив розглянути комп'ютерну систему управління як інтегровану структуру взаємопов'язаних алгоритмів і моделей. Для формалізації впливу інтелектуального супроводу на показники надійності застосовано методи математичного моделювання, зокрема побудову функціональних залежностей між базовим та залишковим ризиком. Інтерпретація базового ризику здійснювалася з використанням елементів теорії ймовірностей.

Для опису різних рівнів інтелектуалізації використано методи аналітичної апроксимації, що дозволило сформувати лінійні, поліноміальні та логістичні моделі зниження ризику. Обґрунтування адаптивно-інтелектуального рівня виконано на основі аналізу нелінійних залежностей та механізмів параметричної адаптації, які забезпечують динамічне оновлення моделей відповідно до зміни вхідних даних.

Застосування зазначених методів дозволило забезпечити узгодженість між теоретичною моделлю зниження ризику та структурними вимогами до побудови адаптивно-інтелектуальної комп'ютерної системи управління.

Виклад основного матеріалу.

1. Рівні інтелектуалізації комп'ютерних систем

Інтелектуалізація комп'ютерних систем управління розглядається як закономірний етап їх еволюційного розвитку, що відображає перехід від традиційної автоматизованої обробки даних до використання моделей знань, адаптивних алгоритмів та механізмів контекстного аналізу. На відміну від інформатизації, яка була орієнтована переважно на підвищення швидкості обробки та доступності інформації, інтелектуалізація пов'язана із залученням комп'ютерної системи до процесів аналізу, інтерпретації та підтримки прийняття рішень.

У загальному випадку комп'ютерна система управління може виконувати різні функціональні ролі: від інструмента реєстрації та відображення даних до активного учасника процесу формування управлінських рішень. Саме ступінь цієї участі визначає рівень інтелектуалізації системи. Чим більшу частину аналітичних, прогностичних та інтерпретаційних функцій бере на себе комп'ютерна система, тим вищим є її інтелектуальний рівень.

З позицій комп'ютерних наук інтелектуалізація передбачає зміну характеру алгоритмічного забезпечення. Якщо на початкових етапах системи базуються на жорстко детермінованих процедурах обробки даних, то подальший розвиток пов'язаний із впровадженням статистичних моделей, методів оптимізації, механізмів логічного виведення, а згодом – адаптивних алгоритмів та методів машинного навчання. Така еволюція відображає перехід від статичних програмних рішень до динамічних обчислювальних моделей, здатних змінювати власні параметри залежно від умов функціонування.

Особливого значення інтелектуалізація набуває в системах управління критично важливими об'єктами, де помилка оператора може мати суттєві наслідки [8]. У таких умовах комп'ютерна система повинна не лише надавати інформацію, але й сприяти зменшенню невизначеності, виявляти потенційно небезпечні ситуації, прогнозувати розвиток подій та формувати обґрунтовані рекомендації. Водночас повна автономізація управління є небажаною або неприпустимою, що обумовлює необхідність збереження принципу «людина в контурі».

Таким чином, інтелектуалізація може бути інтерпретована як процес поступового підвищення здатності комп'ютерної системи:

- інтегрувати різномірні інформаційні потоки;
- працювати з невизначеністю та неповнотою даних;
- використовувати накопичений досвід у вигляді формалізованих знань;
- адаптувати алгоритмічні механізми до зміни умов;
- зменшувати залишковий ризик операторської помилки.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика рівнів інтелектуалізації комп'ютерних систем управління

Table 1 – Comparative Characteristics of the Levels of Intellectualization of Computer Control Systems

Характеристика	Інформаційний рівень	Аналітичний рівень	Інтелектуально-орієнтований рівень	Адаптивно-інтелектуальний рівень
Основна функція	Моніторинг та відображення	Аналіз і формування альтернатив	Інтерпретація та обґрунтування	Адаптивне прогнозування та супровід
Тип алгоритмів	Детерміновані процедури	Статистичні та оптимізаційні методи	Моделі знань, логічне виведення	Машинне навчання, гібридні моделі
Робота з невизначеністю	Практично відсутня	Часткова	Формалізована	Динамічна та контекстна
Здатність до адаптації	Відсутня	Обмежена	Часткова	Повноцінна
Роль оператора	Повне прийняття рішень	Остаточний вибір альтернатив	Контроль і оцінювання рекомендацій	Контроль і корекція адаптивних рішень

При цьому важливо підкреслити, що інтелектуалізація не зводиться лише до впровадження окремих методів штучного інтелекту. Йдеться про системну зміну архітектури комп'ютерної системи, структури програмного забезпечення та логіки взаємодії з оператором. Підвищення рівня інтелектуалізації супроводжується переходом від реактивної моделі функціонування до прогностично-адаптивної, що забезпечує якісну зміну характеру підтримки прийняття рішень [9].

Для більш чіткої структуризації зазначеного процесу доцільно виділити рівні інтелектуалізації комп'ютерних систем управління, які відображають ступінь складності алгоритмічного забезпечення, глибину використання моделей знань та характер взаємодії з людиною-оператором (табл.1).

Запропонована градація дозволяє систематизувати підходи до проектування інтелектуальних комп'ютерних систем та створює підґрунтя для подальшої формалізації їх впливу на показники надійності та безпеки управління.

1. Формалізована модель інтелектуалізації комп'ютерної системи управління

Інтелектуалізація комп'ютерних систем управління розглядається як поетапний процес підвищення ступеня участі обчислювальних алгоритмів у формуванні управлінських рішень. Формально рівень інтелектуалізації можна трактувати як функціональну здатність системи зменшувати невизначеність та операторський ризик шляхом обробки даних, використання знань та адаптації моделей [10,11].

Для формалізації введемо узагальнену модель комп'ютерної системи управління у вигляді трійки:

$$S = \langle D, A, M \rangle, \quad (1)$$

де D – множина вхідних даних;

A – множина алгоритмів обробки;

M – множина моделей (статистичних, логічних, прогностичних).

У такому поданні рівень інтелектуалізації визначається:

- складністю алгоритмічної множини A ;
- глибиною та формалізованістю моделей M ;
- наявністю механізмів адаптації параметрів моделей;
- характером взаємодії системи з оператором.

Таким чином, інтелектуалізація пов'язана не лише з розширенням множини алгоритмів, а й зі зміною їх внутрішньої структури та способу використання моделей знань.

1.1 Інформаційний рівень

На інформаційному рівні система виконує функції збору, зберігання, фільтрації та візуалізації даних. Формально:

$$A_1 = \{a_i : D \rightarrow D'\}; \quad (2)$$

де алгоритми реалізують детерміновані перетворення даних без їх контекстної інтерпретації.

Множина моделей M_1 або відсутня, або є статичною. Система не змінює структуру алгоритмів залежно від ситуації. Її вплив на зниження невизначеності опосередкований та пов'язаний виключно з покращенням доступності інформації.

1.2 Аналітичний рівень

Аналітичний рівень характеризується впровадженням статистичних та оптимізаційних алгоритмів:

$$A_2 = \{a_i : D \rightarrow Y\}, \quad (3)$$

де Y – множина альтернатив управлінських рішень.

Множина моделей M_2 включає:

- регресійні залежності,
- методи кластеризації,
- критерії оптимізації.

Система формує альтернативи рішень, однак параметри моделей є фіксованими, а механізми самонавчання відсутні.

1.3 Інтелектуально-орієнтований рівень

На цьому рівні множина моделей набуває структури:

$$M_3 = \{K, R, I\}, \quad (4)$$

де K – база знань; R – правила логічного виведення; I – механізм інтерпретації.

Система здатна враховувати контекст ситуації та пояснювати сформовані рекомендації. Обробка інформації переходить від статистичної до семантичної. Проте параметри знань залишаються відносно стабільними.

1.4 Адаптивно-інтелектуальний рівень

Найвищий рівень інтелектуалізації передбачає наявність механізму динамічної адаптації параметрів моделей:

$$\theta_t + 1 = \theta_t + \Delta\theta(D_t); \quad (5)$$

де θ – вектор параметрів моделі; D_t – поточні дані.

Адаптація може здійснюватися за допомогою градієнтних методів оптимізації, байєсівського оновлення, алгоритмів підкріплювального навчання, гібридних інтелектуальних механізмів.

На цьому рівні множина алгоритмів A стає динамічною, а система здатна змінювати власну поведінку залежно від середовища функціонування. Відбувається перехід від статичної обробки інформації до динамічного моделювання поведінки об'єкта управління.

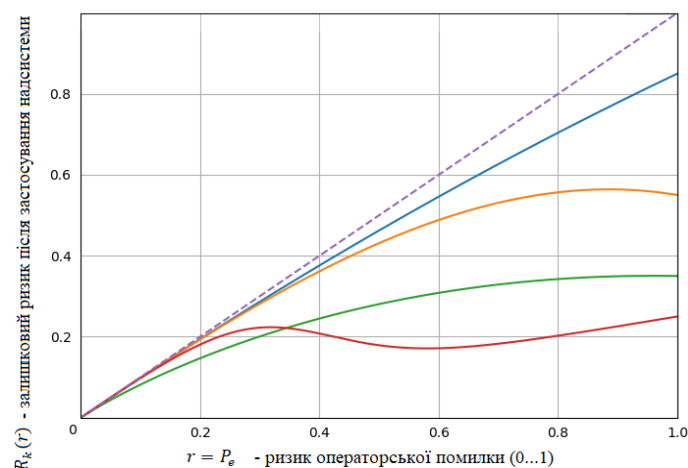


Рисунок 1 – Порівняльний графік залежностей залишкового ризику операторської помилки
Figure 1 – Comparative Graph of Residual Operator Error Risk Dependencies

Отримана формалізація дозволяє пов'язати рівень інтелектуалізації зі здатністю системи зменшувати залишковий ризик операторської помилки. Подальший аналіз буде спрямований на побудову математичної моделі, що встановлює функціональну залежність між рівнем інтелектуалізації та величиною залишкового ризику.

2. Математична модель впливу рівня інтелектуалізації з ризиком операторської помилки.

3. Огляду на те, що основною метою інтелектуалізації є підвищення надійності діяльності людини-оператора, доцільно пов'язати рівні інтелектуалізації з ризиком операторської помилки, у вигляді імовірності P_e . Порівняльний графік функцій залишкового ризику операторської помилки наведено на рис. 1.

Нехай $r = P_e \in [0, 1]$ – базовий ризик операторської помилки за відсутності інтелектуального супроводу. Вибір інтервалу $[0; 1]$ для обох осей забезпечує інваріантність аналізу до предметної області та дозволяє зосередитися на структурних відмінностях між функціональними залежностями.

Для кількісного порівняння рівнів введемо функцію $m_k(r)$, що описує частку ризику, яку вдається зменшити завдяки інтелектуальному супроводу k -го рівня. Тоді залишковий ризик після застосування надсистеми визначається як вираз (6):

$$R_k(r) = r(1 - m_k(r)). \quad (6)$$

Зі зростанням рівня інтелектуалізації форма залежності ускладнюється, а залишковий ризик операторської помилки зменшується. Пунктирна залежність $R = r$ задає еталонну траєкторію ризику за відсутності інтелектуального супроводу і слугує базою для оцінювання ефективності різних режимів інтелектуалізації. Розташування всіх інших кривих нижче цієї лінії вказує на систематичне зменшення залишкового ризику внаслідок залучення комп'ютерної надсистеми інтелектуального супроводу.

Перша крива – інформаційного рівня характеризується наближеністю до лінійної форми, що свідчить про обмежений компенсуючий ефект інтелектуального супроводу. Така залежність відповідає режиму, за якого система виконує переважно інформаційні функції та лише опосередковано впливає на когнітивні процеси оператора. Для інформаційного рівня зниження ризику має майже лінійний характер:

$$\begin{aligned} m_1(r) &= \alpha_1 r, \alpha_1 \ll 1, \\ R_1(r) &= r(1 - \alpha_1 r). \end{aligned} \quad (7)$$

Ця залежність відповідає кривій на рис. 1, що лише не суттєво відхиляється від базового ризику.

Друга крива – аналітичного рівня демонструє нелінійну поведінку з посиленням ефекту зниження ризику при зростанні r . Це відображає специфіку аналітичних методів, ефективність яких суттєво зростає лише після досягнення певного рівня складності ситуації, коли накопичується достатній обсяг даних для їх коректного застосування. Для аналітичного рівня ефект супроводу зростає зі збільшенням складності ситуації:

$$\begin{aligned} m_2(r) &= \alpha_2 r + \beta_2 r^2, \\ R_2(r) &= r(1 - \alpha_2 r - \beta_2 r^2). \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 1 ця крива демонструє помітне зниження ризику лише при великих значеннях r .

Третя крива – інтелектуально-орієнтованого рівня характеризується вираженою чутливістю до середніх значень r , що вказує на принципово інший механізм зниження ризику. Використання знань, правил та контекстної інтерпретації дозволяє системі зменшувати ймовірність помилки оператора навіть у ситуаціях, які ще не досягли критичного рівня небезпеки, але вже потребують когнітивної підтримки. Для інтелектуально-орієнтованого рівня характерною є підвищена чутливість до середніх значень ризику:

$$\begin{aligned} m_3(r) &= \alpha_3 r + \beta_3 \sqrt{r}, \\ R_3(r) &= r(1 - \alpha_3 r - \beta_3 \sqrt{r}). \end{aligned} \quad (9)$$

Відповідна крива на рис. 1 суттєво нижча за $R_1(r)$ та $R_2(r)$ у середньому діапазоні значень r .

Четверта крива – адаптивно-інтелектуального рівня має адаптивний характер і форму, близьку до порогової. Наявність локального мінімуму в області середніх значень r свідчить про те, що інтенсивність інтелектуального супроводу змінюється залежно від складності ситуації. У зоні зростаючої невизначеності система переходить у режим максимальної чутливості, забезпечуючи найсуттєвіше зниження залишкового ризику. При цьому за малих значень r вплив супроводу є мінімальним, що запобігає надмірному втручанню в діяльність оператора, а за великих значень r зберігається ненульовий залишковий ризик, що відповідає принципу «людина в контурі». Для адаптивно-інтелектуального рівня зниження ризику описується логістичною залежністю:

$$\begin{aligned} m_4(r) &= \gamma \frac{1}{1 + e^{-k(r-r_0)}}, 0 < \gamma < 1, \\ R_4(r) &= r(1 - \gamma \frac{1}{1 + e^{-k(r-r_0)}}). \end{aligned} \quad (10)$$

Параметр r_0 визначає поріг переходу до інтенсивного інтелектуального супроводу, а коефіцієнт γ відображає обмеження автономності системи відповідно до принципу «людина в контурі».

Аналіз графіка показує, що підвищення рівня інтелектуалізації супроводжується не просто кількісним зменшенням залишкового ризику операторської помилки, а якісною зміною характеру залежності $R_k(r)$. Перехід від майже лінійних до адаптивних нелінійних функцій відображає зміну ролі комп'ютерної системи – від пасивного джерела інформації до активного інтелектуального суб'єкта взаємодії з оператором, здатного динамічно підтримувати процес прийняття рішень у критичних умовах.

Отримані результати підтверджують, що саме адаптивно-інтелектуальний рівень є найбільш обґрунтованим для реалізації комп'ютерних надсистем інтелектуального супроводу в системах управління складними та критично важливими технічними об'єктами, оскільки він забезпечує мінімізацію залишкового ризику без порушення принципу пріоритету людини в управлінні.

Нижчі рівні інтелектуалізації комп'ютерних систем управління не в повній мірі забезпечують вимоги до надсистем інтелектуального супроводу:

- інформаційний рівень обмежується візуалізацією та моніторингом і не здатний підтримувати когнітивні процеси оператора;
- аналітичний рівень формує альтернативи, але не працює з невизначеністю, конфліктною інформацією та накопиченим досвідом;
- інтелектуально-орієнтований рівень є необхідним базисом, однак без адаптації не забезпечує ефективного супроводу в умовах змінної обстановки та деградації інформації.

Адаптивно-інтелектуальний рівень дозволяє реалізувати ключові функції надсистеми інтелектуального супроводу:

- інтеграцію різнорідних потоків даних та подій;
- контекстний аналіз ситуацій і прогноз їх розвитку;
- адаптацію рекомендацій до поточного стану об'єкта та чергового персоналу;
- накопичення та використання експлуатаційного досвіду;
- зниження когнітивного навантаження на людину.

При цьому принципово важливо, що прийняття остаточного рішення залишається за черговим персоналом, а система виконує функції інтелектуального радника, а не автономного керуючого агента.

3. Архітектурна модель адаптивно-інтелектуальної системи

Запропонована архітектурна модель адаптивно-інтелектуальної комп'ютерної системи управління (рис.2) відображає перехід від традиційної ієрархічної структури обробки даних до багаторівневої інтегрованої системи з механізмами прогнозування, адаптації та зворотного зв'язку. Її побудова ґрунтується на необхідності забезпечення безперервного аналізу стану об'єкта, оцінювання ризику, формування рекомендацій та динамічного коригування алгоритмів відповідно до зміни умов функціонування.

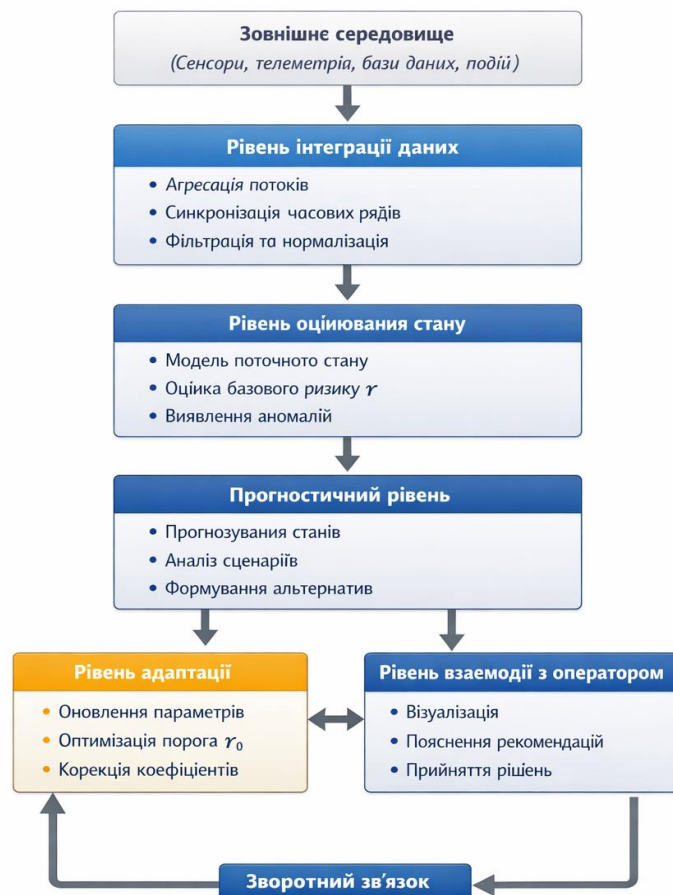


Рисунок 2 – Архітектурна модель адаптивно-інтелектуальної комп'ютерної системи управління
Figure 2 – Architectural Model of an Adaptive-Intelligent Computer Control System

На початковому рівні формується єдиний інформаційний простір системи. Дані, що надходять із різномірних джерел, проходять процедури узгодження, синхронізації та попереднього очищення. Це дозволяє забезпечити коректність подальшого аналітичного опрацювання та усунути вплив випадкових шумів і неточностей вимірювань. Таким чином створюється структурована база для побудови внутрішньої моделі стану об'єкта управління

Наступний рівень пов'язаний з оцінюванням поточного стану системи. На основі інтегрованих даних формується узагальнена модель, що відображає актуальні параметри функціонування об'єкта. Саме на цьому етапі здійснюється оцінювання базового ризику операторської помилки та виявлення аномальних режимів роботи. Отримана оцінка ризику виступає ключовим параметром для подальших інтелектуальних процедур [12].

Прогностичний рівень забезпечує аналіз можливих сценаріїв розвитку ситуації. Застосування моделей прогнозування дозволяє не лише зафіксувати поточний стан, а й передбачити його зміну у часовій перспективі. Формується множина альтернатив управлінських рішень, кожна з яких оцінюється з позицій впливу на залишковий ризик. Таким чином система переходить від реактивного до проактивного режиму функціонування.

Особливістю адаптивно-інтелектуальної архітектури є наявність рівня адаптації. На цьому етапі параметри моделей коригуються залежно від нових даних, результатів прогнозування та зворотного зв'язку. Адаптація забезпечує динамічну перебудову внутрішніх алгоритмів, що дозволяє системі зберігати ефективність навіть в умовах зміни характеристик об'єкта або деградації інформації. Саме цей механізм забезпечує реалізацію логістичної залежності зниження ризику, коли інтенсивність інтелектуального супроводу змінюється залежно від рівня невизначеності.

Верхній рівень архітектури пов'язаний із взаємодією з оператором. Система надає пояснення сформованих рекомендацій, відображає прогнозовані сценарії та дозволяє здійснювати корекцію рішень. Остаточне управлінське рішення залишається за людиною, що відповідає принципу «людина в контурі». Зворотний зв'язок від оператора впливає на механізм адаптації, формуючи замкнений контур інтелектуального супроводу.

Узагальнюючи, можна зазначити, що запропонована архітектура відображає якісну трансформацію комп'ютерної системи управління: від пасивного інструмента обробки інформації до активного адаптивного середовища підтримки прийняття рішень. Вона структурно узгоджується з математичною моделлю зниження залишкового ризику та забезпечує практичну реалізацію порогового механізму активації інтелектуального супроводу. Саме інтеграція прогнозування, адаптації та зворотного зв'язку формує основу для підвищення надійності управління критично важливими об'єктами.

Висновки. У статті досліджено підходи до формалізації вимог до інтелектуальних комп'ютерних систем управління критично важливими об'єктами з позицій зниження операторського ризику.

Проаналізовано еволюцію комп'ютерних систем управління та виокремлено чотири рівні їх інтелектуалізації. Показано, що підвищення рівня інтелектуалізації супроводжується переходом від детермінованої обробки даних до адаптивного прогностно-аналітичного супроводу прийняття рішень.

Запропоновано формалізовану модель залишкового ризику операторської помилки у вигляді функціональної залежності, що дозволяє кількісно оцінювати ефективність інтелектуального супроводу. Розроблено аналітичні залежності зниження ризику для різних рівнів інтелектуалізації та обґрунтовано використання логістичної моделі для адаптивно-інтелектуального рівня.

Сформовано алгоритмічні та архітектурні вимоги до адаптивно-інтелектуальної системи, яку представлено у вигляді багаторівневої структури з адаптивним зворотним контуром.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у критично важливих об'єктах.

Перелік посилань

1. Moiseenko V., Kameniev O., Gaievskiy V. Predicting a technical condition of railway automation hardware under conditions of limited statistical data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, № 9 (88). P. 26–35. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102005>.
2. Holub H., Tkachuk M., Melenchuk V., Lushchai Y. A system model of decision-making transportation process management in transport infrastructure projects. *Transport Systems and Technologies*. 2023. № 40. P. 219–226. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-19>.
3. Kulbovskiy I., Tkachuk M. Prospects of applying artificial intelligence in microprocessor systems for railway traffic control // *Transport Means : Proceedings of the International Conference*. 2024. P. 712–715.
4. Samsonkin V., Yurchenko O., Sorochynska O., Rohovyi O., Bureika G. Decarbonizing Strategy of Ukrainian Transport Sector. *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort*. ITSESQC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1335. Cham : Springer, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_10.
5. Сорока А., Голуб Г. М. Аналіз і прогнозування витрат у великих корпораціях: інтеграція сучасних аналітичних моделей. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 11 (52). DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-2727-2741](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-2727-2741).
6. Голуб Г. М., Воронко І. О., Бачинський В., Корчовий В. Інтегрована оптимізація алгоритмів машинного навчання та хмарних ресурсів для обробки великих даних у транспортних системах. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 11 (52). DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-1990-2000](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1990-2000).
7. Stasiuk A., Kuznetsov V., Goncharova L., Hubskeyi P. Models of the computer intellectualization optimal strategy of the power supply fast-flowing technological processes of the railways traction substations. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2021. Vol. 23, № 2. P. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.C30-C36>.
8. Panchenko N. The formation of the system of risk-management on railway transport of Ukraine. *Agrosvit*. 2018. № 22. P. 34. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2018.22.34>
9. Мойсеєнко В. І., Чегодаєв Б. В., Зотова О. С. Методи діагностування систем залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 4. С. 26–32.
10. Sorochynska O., Melnichenko O., Kulbovskiy I., Tkachenko V. System model for the formation of organizational and technical processes for the prevention of emergency situations in transport complex projects. *Transport Systems and Technologies*. 2025. № 46. URL: <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/438>.
11. Holub H., Kulbovskiy I., Skliarenko I., Bambura O., Tkachuk M. Research of methods for identification of emergency modes of power supply system in transport infrastructure projects. *Technology Audit and Production Reserves*. 2019. № 5/2 (49). P. 34–36. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.182830>.
12. Samsonkin V., Sotnyk V., Yurchenko O., Zmii S., Myronenko V., Soloviova O. Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 6/3 (120). P. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715>.

MATHEMATICAL MODEL OF INTELLECTUALIZATION OF COMPUTER CONTROL SYSTEMS FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS

Tkachuk Mykola S., Postgraduate Student of the Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, Educational and Scientific Kyiv Institute of Railway Transport, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kt20@ukr.net, tel.: +380 96 540 9623, <https://orcid.org/0000-0002-9683-4303>

Chechuga Oleksandr S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: chechuga77@gmail.com, тел. +380662019442. <https://orcid.org/0000-0003-1643-6354>

Анотація. The paper investigates the theoretical, algorithmic, and structural foundations for the development of intelligent computer control systems intended for operation at critical infrastructure facilities with increased reliability and safety requirements. The relevance of the study is determined by the growing complexity of modern technical and transport systems, the increasing volume of heterogeneous data processed in real time, and the necessity to minimize operator risk under conditions of uncertainty, incompleteness, and inconsistency of information. Under such conditions, traditional deterministic data-processing algorithms prove insufficient, which necessitates a formalized approach to the intellectualization of computer control systems.

A mathematical model of the intellectualization of computer control systems is proposed, providing a staged transition from informational and analytical levels to knowledge-oriented and adaptive-intelligent levels of operation. Within the proposed framework, the baseline and residual operator error risks are formalized as a functional relationship between the initial probability of error and the efficiency of intelligent decision support. Analytical models for risk reduction at different levels of intellectualization are developed, including linear, polynomial, and logistic dependencies that reflect qualitative changes in the risk compensation mechanism.

It is demonstrated that the adaptive-intelligent level, implemented using artificial intelligence methods, machine learning techniques, and contextual analysis, ensures nonlinear and threshold-based regulation of decision-support intensity. This approach enables minimization of residual risk without violating the “human-in-the-loop” principle and ensures consistency between automated analysis and expert operator judgment. The proposed model provides a theoretical basis for the development of adaptive decision-support systems and can be applied in the design of intelligent computer control systems in domains with increased requirements for safety, reliability, and adaptability of computational processes.

Keywords: Intelligent computer systems, algorithm, mathematical model, information, methods, reliability, intellectualization, architecture, artificial intelligence, safety, data processing, knowledge base.

References

1. Moiseenko, V., Kameniev, O., & Gaievskiy, V. (2017). Predicting a technical condition of railway automation hardware under conditions of limited statistical data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(9(88)), 26–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102005>
2. Holub, H., Tkachuk, M., Melenchuk, V., & Lushchai, Y. (2023). A system model of decision-making transportation process management in transport infrastructure projects. *Transport Systems and Technologies*, (40), 219–226. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-19>
3. Kulbovskiy, I., & Tkachuk, M. (2024). Prospects of applying artificial intelligence in microprocessor systems for railway traffic control. In *Transport Means: Proceedings of the International Conference* (pp. 712–715).
4. Samsonkin, V., Yurchenko, O., Sorochynska, O., Rohovyi, O., & Bureika, G. (2025). Decarbonizing strategy of Ukrainian transport sector. In O. Slavinska, V. Danchuk, O. Kunytska, & O. Hulchak (Eds.), *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort* (ITSESQC 2024) (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1335). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_10
5. Soroka, A., & Holub, H. M. (2025). Analiz i prohnozuvannya vytrat u velykykh korporatsiakh: intehtatsiia suchasnykh analitychnykh modelei (Analysis and forecasting of costs in large corporations: integration of modern analytical models). *Nauka i tekhnika sohodni*, 11(52). [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-2727-2741](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-2727-2741) [in Ukrainian]
6. Holub, H. M., Voronko, I. O., Bachynskiy, V., & Korchovyi, V. (2025). Intehrovana optymizatsiia alhorytmiv mashynnoho navchannia ta khmarnykh resursiv dlia obrobky velykykh danykh u transportnykh systemakh (Integrated optimization of machine learning algorithms and cloud resources for big data processing in transport systems). *Nauka i tekhnika sohodni*, 11(52). [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-1990-2000](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1990-2000) [in Ukrainian]

7. Stasiuk, A., Kuznetsov, V., Goncharova, L., & Hubskeyi, P. (2021). Models of the computer intellectualization optimal strategy of the power supply fast-flowing technological processes of the railways traction substations. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 23(2), 30–36. <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.C30-C36>
8. Panchenko, N. (2018). The formation of the system of risk-management on railway transport of Ukraine. *Agrosvit*, (22), 34. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2018.22.34>
9. Moiseienko, V. I., Chehodaev, B. V., & Zotova, O. S. (2014). Metody diahnostuvannia system zaliznychnoi avtomatyky (Methods of diagnostics of railway automation systems). *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (4), 26–32. [in Ukrainian]
10. Sorochynska, O., Melnichenko, O., Kulbovskyi, I., & Tkachenko, V. (2025). System model for the formation of organizational and technical processes for the prevention of emergency situations in transport complex projects. *Transport Systems and Technologies*, (46). Retrieved from <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/438>
11. Holub, H., Kulbovskyi, I., Skliarenko, I., Bambura, O., & Tkachuk, M. (2019). Research of methods for identification of emergency modes of power supply system in transport infrastructure projects. *Technology Audit and Production Reserves*, 5/2(49), 34–36. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.182830>
12. Samsonkin, V., Sotnyk, V., Yurchenko, O., Zmii, S., Myronenko, V., & Soloviova, O. (2022). Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/3(120), 32–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715>

Дата надходження до редакції 27.01.2026.
Дата прийняття статті після рецензування 20.02.2026.

УДК 528:332.3
UDC 528:332.3

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-100-106

**ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНКИ РІВНЯ ФОРМУВАННЯ ТА
ВИКОРИСТАННЯ ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВІДБУДОВИ ЗЕМЕЛЬ
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ: ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ**

**INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT FOR ASSESSING THE LEVEL OF
DEVELOPMENT AND USE OF GEO-ECOLOGICAL MONITORING OF LAND RESTORATION
IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE: THEORETICAL ASPECTS**



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>



Бубела Андрій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: bubelaandrey@ukr.net, тел.. +380505535594

<https://orcid.org/0000-0002-5619-003X>

Анотація. Актуальність теми дослідження обумовлена значними руйнуваннями земельно-майнового комплексу та необхідно його відбудову на регіональному рівні. Враховуючи глибину і складність проблем, визначена актуальність й необхідність формування інформаційно-аналітичного забезпечення оцінки рівня формування та використання геоєкологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури.

Досягнута мета дослідження відносно обґрунтування інформаційно-аналітичного забезпечення оцінки рівня формування та використання геоєкологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури.

Вирішені завдання: визначення напрямів та особливостей формування інформаційно-аналітичного забезпечення оцінки рівня формування та використання геоєкологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури; виокремлення чинників, що впливають на формування та використання геоєкологічного моніторингу.

На основі визначених напрямів та аналітичних даних, сформовано інформаційно-аналітичне забезпечення щодо розробки й реалізації геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури. Воно дозволяє виокремити земельні, екологічні, транспортні й безпекові чинники та побудувати багаторівневу систему показників для створення кількісної основи геоecологічного моніторингу.

Ключові слова: геоecологічний моніторинг, інформаційно-аналітичне забезпечення, відбудова територій, землі транспортної інфраструктури, оцінка.

Вступ. Актуальність теми дослідження обумовлена значними руйнуваннями земельно-майнового комплексу та необхідністю його відбудови на регіональному рівні. За оцінками Міністерства розвитку громад і територій, на початку червня щонайменше 116 тисяч житлових будинків, у яких мешкали 3,5 мільйонів людей, були пошкоджені або зруйновані. За даними Київської школи економіки, станом на 25 травня пошкоджено або зруйновано близько 44 мільйонів квадратних метрів житла — вони оцінюють збитки у 39,3 мільярда доларів (перші півроку воєнного стану) [1]. Протягом всього 2022 р. втрати у житловому фонді зросли і склали від 135 до 817 тисяч зруйнованих або пошкоджених будівель [2]. Представлені дані є приблизними, що свідчить про відсутність єдиної моніторингової системи зруйнованого житла, що негативно впливає на процеси відбудови та життєдіяльність населення регіонів, вносить соціально-економічні протиріччя. За даними Київської школи економіки за рік з початку повномасштабного російського військового вторгнення загальна сума прямих задокументованих збитків житловій та нежитловій нерухомості, іншій інфраструктурі склала понад \$143,8 млрд. (станом на лютий 2023 р.). Найбільша частка у загальному обсязі прямих втрат належить житловим будівлям (37,3% або \$53,6) та інфраструктурі (25,2% або \$36,2 млрд) [3]. У 2024 р. продовжували зростати втрати від ведення агресивних бойових дій. З початку повномасштабного вторгнення прямі втрати завдані Україні складають 1,164 млрд. дол. [4].

Отже, враховуючи глибину і складність представлених проблем, визначена актуальність й необхідність формування інформаційно-аналітичного забезпечення оцінки рівня формування та використання геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури.

Огляд існуючих теоретичних розробок. В існуючих наукових розробках визначаються напрями та особливості використання геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури регіонів [5, 6]. Інструментарій застосування геоінформаційних систем в геоecологічному моніторингу обґрунтовано у [7, 8].

Для розробки геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури формується кількісна основа із застосуванням математичного моделювання [9, 10].

Поряд з цим, залишаються невирішеними питання формування інформаційно-аналітичного забезпечення оцінки рівня формування та використання геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури.

Метою дослідження є обґрунтування інформаційно-аналітичного забезпечення оцінки рівня формування та використання геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання:

- визначення напрямів та особливостей формування інформаційно-аналітичного забезпечення оцінки рівня формування та використання геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури;
- виокремлення чинників, що впливають на формування та використання геоecологічного моніторингу.

Виклад основного матеріалу. Сучасні неоднозначні умови, які характеризуються зниженням основних показників функціонування регіонів, негативним впливом зовнішніх і внутрішніх чинників, наслідками агресії РФ, потребують переосмислення підходів до формування та реалізації напрямів відбудови земельно-майнового комплексу на регіональному рівні на основі відповідного інформаційно-аналітичного забезпечення. Зокрема, за даними Державної служби статистики України,

навіть за «передвоєнними» показниками, спостерігається скорочення чисельності населення за всіма регіонами, окрім Київського. Індикатор очікувань зайнятості працівників, починаючи з 2022 р. скорочувався, і в 4 кварталі 2025 р. визначається на рівні 98,9 % [11].

За досліджений період відбувається скорочення індикатора очікувань щодо зайнятості працівників за рахунок зниження його компонентів:

- очікуваних змін кількості працівників на підприємствах переробної промисловості в наступні три місяці;
- очікуваних змін кількості працівників на будівельних підприємствах у наступні три місяці;
- очікуваних змін кількості працівників на підприємствах роздрібної торгівлі в наступні три місяці;
- очікувані змін кількості працівників на підприємствах сфери послуг у наступні три місяці.

Представлені тенденції свідчать про негативний стан у сфері формування робочого потенціалу, що знижує можливості для відновлення транспортної інфраструктури, використання земель, враховуючи екологічні параметри. Відбувається зниження обсягів капітальних інвестицій у 2022 р. порівняно з 2021 р. у цілому по Україні на 39,2% та за регіонами, де рівень скорочення варіюється: від 16,5% у Вінницькому регіоні до 82,9% у Донецькому та 94% у Луганському регіонах. У наступних періодах спостерігається зростання обсягів капітальних інвестицій за видами економічної діяльності. Про це свідчать значення індексу капітальних інвестицій у 2023 – 2024 рр. [11].

Слід вказати на скорочення рівня індексів промислової продукції, сільськогосподарської продукції.

Неоднозначними тенденціями характеризуються індекси будівельної продукції, які визначаються значними «шоковими» падіннями перших місяців війни, стагнаціями і адаптаційними тенденціями наступних місяців здійснення воєнних дій. За регіонами України відбувається хвилеподібні тенденції щодо вантажних перевезень автомобільним транспортом у січні 2022 р. по відповідного періоду минулого року. Крім того, поглиблюються процеси екологічних дисбалансів на регіональному рівні, що пов'язано із неоднозначними тенденціями зростання викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів. Спостерігається зниження обсягів капітальних інвестицій на охорону навколишнього природного середовища у цілому по Україні на 18,5% за рахунок скорочення по регіонах: Волинський (9,5%); Запорізький (16,7%); Київський (95,9%); Кіровоградський (37,2%); Львівський (25,4%); Хмельницький (13,9%); Чернігівський (0,56%).

Відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках важливість транспортної інфраструктури полягає у тому, що вона з урахуванням тимчасово окупованої території має розгалужену залізничну мережу (експлуатаційна довжина залізничних колій станом на серпень 2024 року становить 19759,8 кілометра), розвинуту мережу автомобільних доріг (національна мережа автомобільних доріг загального користування становить 166,3 тис. кілометрів, з них 47,7 тис. кілометрів автомобільних доріг державного значення та 118,6 тис. кілометрів автомобільних доріг місцевого значення), 18 морських портів (станом на вересень 2024 року функціонують лише шість портів), а також 26 річкових терміналів, 18 аеропортів, 14 з яких є міжнародними, та широку мережу авіаційних сполучень (на даний час Україна має діючі двосторонні угоди про авіаційне сполучення із 64 країнами), розгалужену мережу маршрутів пасажирського транспорту (зокрема понад 3,8 тис. міжобласних автобусних маршрутів), автобусних станцій, 199 пунктів пропуску через державний кордон, з яких 29 повітряних, 28 морських, два поромних, десять річкових та 59 залізничних, а також 100 пунктів пропуску через державний кордон для автомобільного сполучення, що створює необхідні умови для задоволення потреб користувачів транспорту в наданні транспортних послуг [12].

Екологічні показники вказують на зниження обсягів утворених відходів порівняно з їх обробкою.

Структура непрямих фінансових втрат від ведення агресивних бойових дій за секторами економіки представлена в табл. 1. Найбільша їх питома вага визначається у секторах: промисловість, будівництво та послуги; торгівля; сільське господарство.

Таблиця 1 – Структура непрямих фінансових втрат від ведення агресивних бойових дій за секторами економіки, млрд. дол. за [4]

Table 1 – Structure of indirect financial losses from aggressive military operations by economic sector, billion dollars, according to [4]

Сектор економіки	Оцінка непрямих втрат за методом	
	Виручка	Додана вартість
Промисловість, будівництво та послуги	409,9	133,2
Торгівля	450,5	74,4
Розмінування	42,0	42,0
Сільське господарство	83,1	33,2
Житловий сектор	22,4	22,4
Транспорт	38,8	18,0
Енергетика	43,1	12,0
Охорона здоров'я	11,4	11,1
Соціальний захист	10,0	10,0
Цифрова інфраструктура	19,3	8,8
Освіта	14,5	8,4
Житлово-комунальне господарство	7,7	3,9
Фінансовий сектор	4,3	4,3
Культура	7,3	2,9
Всього	1164,4	385,7

Поряд з цим, суттєвими втратами характеризуються: житловий сектор; транспорт; енергетика; цифрова інфраструктура; освіта.

Результати оцінки непрямих втрат внаслідок військової агресії РФ на транспорті представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати оцінки непрямих втрат внаслідок військової агресії РФ на транспорті, млрд. дол. за [4]

Table 2 – Results of the assessment of indirect losses due to Russian military aggression in transport, billion dollars, according to [4]

Види втрат	Оцінка втрат за методом	
	Виручка	Додана вартість
Зменшення доходу (автомобільний транспорт)	7,130	3,257
Зменшення доходу (повітряний транспорт)	6,442	2,943
Зменшення доходу (залізничний транспорт)	5,666	2,588
Зменшення доходу (складське господарство)	4,313	1,970
Зменшення доходу (водний транспорт)	3,849	1,758
Зменшення доходу (пошта та кур'єрські послуги)	1,332	0,608
Зменшення доходу (приміський транспорт)	0,985	0,450
Зменшення доходу (інше)	6,763	3,090
Витрати на демонтаж та вивезення будівельних відходів	2,334	2,334
Загальні непрямі втрати сектору	38,814	18,998

Встановлено зменшення доходу від використання: автомобільного транспорту; повітряного транспорту; залізничного транспорту; складського господарства; водного транспорту; пошти та надання кур'єрських послуг; приміського транспорту.

Слід вказати на інші втрати та витрати на демонтаж та вивезення будівельних відходів.

Відновлення транспортної інфраструктури, зруйнованої або пошкодженої внаслідок збройної агресії Російської Федерації проти України, має за можливості здійснюватися на якісно вищому рівні (за принципом «build back better» - «відбудуй краще, ніж було»), в тому числі з урахуванням стандартів, передбачених міжнародно-правовими зобов'язаннями України у сфері європейської інтеграції, права Європейського Союзу (acquis EC), зокрема стандартів щодо безпеки на транспорті та декарбонізації транспорту [12].

До того ж для забезпечення відновлення, реконструкції та модернізації на принципах доброчесності, підзвітності, ефективності та прозорості, «відбудуй краще, ніж було», розбудови довіри між Кабінетом Міністрів України, громадянами, бізнесом і фінансовими установами впроваджується Єдина цифрова інтегрована інформаційно-аналітична система управління процесом відбудови об'єктів нерухомого майна, будівництва та інфраструктури (екосистема DREAM). Екосистема DREAM повинна сприяти прозорості та підзвітності під час відбору та реалізації проектів відновлення, зокрема в галузі транспорту, моніторингу їх фінансування, а також здійснення контролю реалізації на всіх етапах. На початок жовтня 2024 року до екосистеми DREAM подано близько 700 проектів відновлення транспортних послуг з орієнтовним бюджетом близько 77 млрд. грн. [12].

Наслідки агресії РФ впливають на екологічний стан та безпеку. Зокрема, спостерігається забруднення за напрямками:

- 1 л. забруднює 15 м³ атмосферного повітря;
- пошкоджено, зруйновано, захоплено 109 заводів;
- більш ніж 30 % вкрито мінами;
- пошкоджено 3 млн. га лісу [13].

Спостерігається забруднення води внаслідок: затоплення шахт; забруднення агрохімікатами (більш ніж 6 млн. чол. мають проблеми із доступом до питної води); обстрілу дамб (показовим є порушення Каховської дамби); знищення військової техніки [13].

Відбувається забруднення ґрунту за рахунок: мінування територій; детонація боєприпасів, що призводить до перевищення забруднення ґрунтів у 6–8 разів; поховання вбитих; рух військової техніки; зростання важких металів у ґрунтах [13].

Висновки. Таким чином, на основі визначених напрямів та аналітичних даних, сформовано інформаційно-аналітичне забезпечення щодо розробки й реалізації геоecологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури. Воно дозволяє виокремити земельні, екологічні, транспортні й безпекові чинники та побудувати багаторівневу систему показників для створення кількісної основи геоecологічного моніторингу.

Перелік посилань

1. Житло і війна в Україні (24 березня – 3 червня 2022). URL: <https://cedos.org.ua/researches/zhytlo-i-vijna-v-ukrayini-24-bereznia-3-chervnya-2022>
2. Житло і війна: житлова політика першого року повномасштабної війни. URL: <https://cedos.org.ua/researches/zhytlo-i-vijna-richnyj-oglyad>
3. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України за рік від початку повномасштабного вторгнення. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/03/UKR_Feb23_FINAL_Damages-Report.pdf
4. Звіт про непрямі фінансові втрати економіки внаслідок військової агресії Росії проти України станом на 1 липня 2024 року. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/30.09.24_Losses_Report-ua.pdf
5. Ватуля Г.Л., Мамонов К.А., Гой В.В., Нелін Є.О. Технологія формування й застосування геоecологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів. Науковий вісник будівництва. 2025. Випуск № 113. С. 216–221. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/uk/article/view/1920/1858>.

6. 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 геоecологічного 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>
7. Mamonov K.A., Frolov V.O., Kasyanov V.V., Yevdokimov A.A. Geoinformation support for soil condition in the territorial organisation system. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2025. Випуск 118. Частина 2. С. 138–147. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.2/138.pdf
8. 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. Випуск 213. С. 92–101. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirn_213-doi.pdf
9. Мамонов К.А., Ватуля Г.Л., Гой В.В., Нелін Є.О. Формування кількісної основи розробки й застосування геоecологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури регіонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2025. Випуск 118. Частина 2. С. 116–123. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.2/116.pdf
10. 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>
11. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>
12. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках. Постанова Кабінету міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-п#Text>
13. Війна та екологія: чому природа стає жертвою збройного конфлікту? URL: <https://iaa.org.ua/articles/vijna-ta-ekologiya-chomu-priroda-staye-zhertvoyu-zbrojnogo-konfliktu/>

INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT FOR ASSESSING THE LEVEL OF DEVELOPMENT AND USE OF GEO-ECOLOGICAL MONITORING OF LAND RESTORATION IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE: THEORETICAL ASPECTS

Mamonov Kostiantyn, 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 Vasil, 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>

Andriy Bubela, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National Transport University, Professor of the Department of Transport Construction and Property Management, e-mail: bubelaandrey@ukr.net, tel.+380505535594, <https://orcid.org/0000-0002-5619-003X>

Summary. The relevance of the research topic is determined by the significant destruction of the land and property complex and the need for its reconstruction at the regional level. Given the depth and complexity of the problems, the relevance and necessity of forming information and analytical support for assessing the level of formation and use of geo-ecological monitoring of the restoration of transport infrastructure lands has been determined.

The research objective has been achieved in terms of substantiating the information and analytical support for assessing the level of formation and use of geo-ecological monitoring of the restoration of transport infrastructure lands.

The following tasks have been solved: determining the directions and features of the formation of information and analytical support for assessing the level of formation and use of geo-ecological monitoring

of the restoration of transport infrastructure lands; identifying factors that influence the formation and use of geo-ecological monitoring.

Based on the identified directions and analytical data, information and analytical support for the development and implementation of geo-ecological monitoring of the restoration of transport infrastructure lands has been formed. It allows identifying land, environmental, transport and security factors and building a multi-level system of indicators to create a quantitative basis for geo-ecological monitoring.

Keywords: geo-ecological monitoring, information and analytical support, restoration of territories, transport infrastructure land, assessment.

References

1. Housing and War in Ukraine (24 March – 3 June 2022). URL: <https://cedos.org.ua/researches/zhytlo-i-vijna-v-ukrayini-24-bereznya-3-chervnya-2022> [in Ukrainian].
2. Housing and war: housing policy in the first year of full-scale war. URL: <https://cedos.org.ua/researches/zhytlo-i-vijna-richnyj-oglyad> [in Ukrainian].
3. Report on direct infrastructure damage from destruction caused by Russia's military aggression against Ukraine in the year since the start of the full-scale invasion. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/03/UKR_Feb23_FINAL_Damages-Report.pdf [in Ukrainian].
4. Report on indirect financial losses to the economy as a result of Russia's military aggression against Ukraine as of 1 July 2024. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/30.09.24_Losses_Report-ua.pdf [in Ukrainian].
5. Vatulia, G., Mamonov, K., Goi, V., Nelin, E. (2025). Methods for establishing and applying geo-ecological monitoring of land use for transport infrastructure in regions. Scientific Bulletin of Construction. Issue № 113. pp. 216–221. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/uk/article/view/1920/1858> [in Ukrainian].
6. Mamonov, K., Vatulia, G., Viatkin, R., Nelin, E. (2025). Directions and characteristics of land use for the reconstruction of transport infrastructure at the regional level within the geo-ecological monitoring system. Municipal Economy of Cities Vol. 4. Issue 192. pp. 272–278. URL: <https://khgts.kname.edu.ua/index.php/khgts/uk/article/view/6540/6461> [in Ukrainian].
7. Mamonov, K., Frolov, V., Kasyanov, V., Yevdokimov, A. (2025). Geoinformation support for soil condition in the territorial organisation system. Automobile roads and road construction. Issue 118. Part 2. Pp. 138–147. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.2/138.pdf [in Ukrainian].
8. Mamonov, K., Goi, V., Khariv, V. (2025). GIS in the system of geospatial monitoring of land use for residential and public development in the regions. Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State University of Transport and Communications. Issue 213. pp. 92–101. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/tht_zbirm_213-doi.pdf [in Ukrainian].
9. Mamonov, K., Vatulia, G., Goi, V., Nelin, E. (2025). Establishing a quantitative basis for the development and application of geo-ecological monitoring of land use for transport infrastructure in the regions. Automobile roads and road construction. Issue 118. Part 2. pp. 116–123. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.2/116.pdf [in Ukrainian].
10. 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. Vol. 9. № 3. pp. 287–292. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-3-50> [in Ukrainian].
11. Official website of the State Statistics Service of Ukraine. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian].
12. On the approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030 and the approval of the operational plan of measures for its implementation in 2025-2027. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 1550 of 27 December 2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-р#Text> [in Ukrainian].
13. War and ecology: why is nature becoming a victim of armed conflict? URL: <https://iaa.org.ua/articles/vijna-ta-ekologiya-chomu-pryroda-staye-zhertvoyu-zbrojnogo-konfliktu/> [in Ukrainian].

Дата надходження до редакції 18.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 11.01.2026.

УДК 528:332.3
UDC 528:332.3

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-107-113

ТРАНСПОРТНА ІНФРАСТРУКТУРА У СИСТЕМІ ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВІДБУДОВИ ЗЕМЕЛЬ

TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN THE GEO-ECOLOGICAL MONITORING SYSTEM FOR LAND RESTORATION



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>



Радзінська Юлія Борисівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: Yuliia.Radzinska@kname.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0002-1661-7975>

Анотація. У статті визначена актуальність дослідження, яка визначається необхідністю забезпечення ефективності використання земель транспортної інфраструктури шляхом застосування сучасних геоінформаційних систем. На процеси використання земель транспортної інфраструктури впливають наслідки ведення агресивних бойових дій.

У роботі досягнута мета відносно визначення транспортної інфраструктури у системі геоекологічного моніторингу відбудови земель. Для досягнення поставленої мети вирішені завдання: обґрунтування теоретичних положень до визначення транспортної інфраструктури; виявлення особливостей функціонування транспортної інфраструктури.

Встановлено, що відновлення транспортної інфраструктури, зруйнованої або пошкодженої внаслідок збройної агресії Російської Федерації проти України, має за можливості здійснюватися на якісно вищому рівні (за принципом *«build back better»* - «відбудуй краще, ніж було»), в тому числі з урахуванням стандартів, передбачених міжнародно-правовими зобов'язаннями України у сфері європейської інтеграції, права Європейського Союзу (*acquis EC*), зокрема стандартів щодо безпеки на транспорті та декарбонізації транспорту.

Для розробки геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури формується кількісна основа, яка створюється на основі застосування математичного інструментарію, аналітичних і експертних методів, екологічного й просторового забезпечення, інформаційних параметрів та особливостей забезпечення будівництва.

Для формування та функціонування транспортної інфраструктури запропоновано застосовувати геоінформаційні системи.

У результаті дослідження визначена транспортна інфраструктура як система транспортних комунікацій, що забезпечує формування пасажиро-вантажних перевезень, та визначається комплексом технічних споруд та пристроїв її функціонування, земельними ресурсами, безпековими параметрами і призводить до безперебійної діяльності кінцевих ланцюгів споживання, враховуючи вплив екологічних чинників.

Виявлені особливості функціонування транспортної інфраструктури, яка характеризується системністю, впливом зовнішніх і внутрішніх чинників, земельних відносин, безпекового стану, екологічних чинників.

Ключові слова: геоекологічний моніторинг, відбудова територій, землі транспортної інфраструктури, транспортна інфраструктура.

Вступ. Сучасні умови використання земель, неоднозначний вплив зовнішніх і внутрішніх чинників, потребують переосмислення підходів до застосування сучасного моніторингового інструментарію. У цьому процесі особливого значення набуває забезпечення ефективності використання земель транспортної інфраструктури шляхом застосування сучасних геоінформаційних систем. На процеси використання земель транспортної інфраструктури впливають наслідки ведення агресивних бойових дій.

Враховуючи вищезазначене, тема дослідження щодо визначення транспортної інфраструктури та особливості її функціонування у системі геоекологічного моніторингу відбудови земель є актуальною і має важливого значення для розвитку як регіонів, так і держави у цілому.

Огляд існуючих теоретичних розробок. Згідно з даними звіту Світового Банку, за результатами проведення Третьої швидкої оцінки завданої шкоди та потреб на відновлення (The Third Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment, RDNA3), загальна сума збитків, завданих транспортному сектору, станом на 31 грудня 2023 р. оцінювалася в 30,5 млрд. євро, тоді як потреби в реконструкції і негайному відновленні оцінені в 66,8 млрд. євро. Найбільших обсягів потребує відновлення автомобільних доріг державного значення (29 відсотків), залізнична інфраструктура, рухомий склад, обладнання та інші активи (24 відсотків), а також автомобільні дороги місцевого значення (16 відсотків) [1].

Велика площа території України забруднена вибухонебезпечними предметами, заміновано акваторію Чорного та Азовського морів, що суттєво ускладнює відновлення транспортної інфраструктури та наражає на небезпеку громадян, операторів надання транспортних послуг, інших суб'єктів. Згідно з даними Мінекономіки, площа потенційно забруднених вибухонебезпечними предметами територій в Україні становить 144 тис. кв. кілометрів, або 24 відсотка загальної площі [1].

Характеризуючи втрати від ведення агресивних бойових дій, визначено, що непрямі фінансові втрати в транспортному секторі у 2024 р. складають 38,8 млрд. дол. або майже 19 млрд. дол. (додана вартість). Ця сума включає недоотримання доходів підприємствами сектору, витрати на демонтаж зруйнованих об'єктів, економічні витрати, зменшення видатків на дорожнє будівництво, економічні витрати, пов'язані з виконанням цивільних та військових задач тощо [2].

Метою дослідження є визначення транспортної інфраструктури у системі геоекологічного моніторингу відбудови земель. Для досягнення поставленої мети вирішуються завдання:

- обґрунтування теоретичних положень до визначення транспортної інфраструктури;
- виявлення особливостей функціонування транспортної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. Узагальнюючи існуючі теоретико-методологічні положення, встановлено, що відсутні єдині підходи до визначення транспортної інфраструктури у системі геоекологічного моніторингу відбудови земель.

У цьому контексті слід відзначити, що відновлення транспортної інфраструктури, зруйнованої або пошкодженої внаслідок збройної агресії Російської Федерації проти України, має за можливості здійснюватися на якісно вищому рівні (за принципом «build back better» - «відбудуй краще, ніж було»), в тому числі з урахуванням стандартів, передбачених міжнародно-правовими зобов'язаннями України

у сфері європейської інтеграції, права Європейського Союзу (acquis EC), зокрема стандартів щодо безпеки на транспорті та декарбонізації транспорту [1].

До того ж для забезпечення відновлення, реконструкції та модернізації на принципах доброчесності, підзвітності, ефективності та прозорості, «відбудуй краще, ніж було», розбудови довіри між Кабінетом Міністрів України, громадянами, бізнесом і фінансовими установами впроваджується Єдина цифрова інтегрована інформаційно-аналітична система управління процесом відбудови об'єктів нерухомого майна, будівництва та інфраструктури (екосистема DREAM). Екосистема DREAM повинна сприяти прозорості та підзвітності під час відбору та реалізації проектів відновлення, зокрема в галузі транспорту, моніторингу їх фінансування, а також здійснення контролю реалізації на всіх етапах. На початок жовтня 2024 року до екосистеми DREAM подано близько 700 проектів відновлення транспортних послуг з орієнтовним бюджетом близько 77 млрд. грн. [1].

Зокрема, увага фокусується на напрямках та особливостях використання земель [3].

Виокремлені ключові сфери здійснення земельних відносин, враховуючи сучасні аспекти та трансформації:

- реєстрація/формальне визначення прав власності на земельні ділянки;
- транзакції щодо зміни права власності та використання;
- оподаткування земельних ділянок;
- розв'язання суперечок щодо земельних ділянок та прав на них;
- зміна форми власності (приватизації та експропріація);
- забезпечення рівності прав між суб'єктами земельних відносин [4].

Розробка та застосування геоекологічного моніторингу здійснюється на основі застосування сучасного інструментарію ГІС, важливість якого визначається у роботах [5–7].

Для розробки геоекологічного моніторингу використання земель транспортної інфраструктури формується кількісна основа, яка створюється на основі застосування математичного інструментарію, аналітичних і експертних методів, екологічного й просторового забезпечення, інформаційних параметрів та особливостей забезпечення будівництва. У цьому контексті слід відзначити розробки [8–10].

У системі геоекологічного моніторингу фокусується увага на визначенні, структурних компонентах і особливостях функціонування транспортної інфраструктури. У цьому контексті виокремлюються елементи транспортної інфраструктури: шляхова мережа всіх видів транспорту; об'єкти транспортного сервісу; пуховий склад; транспортно-логістичні підприємства [11]. Виокремлюються класифікаційні ознаки транспортної інфраструктури:

- функціональні;
- сервісні;
- просторові;
- власності [11].

Визначаючи категоріальний апарат, транспортна інфраструктура характеризується через призму формування та діяльності транспортно-дорожнього комплексу і обґрунтовується як система транспортних комунікацій, що об'єднує всі сучасні види транспорту.

За розміщенням та структурою вони в цілому відповідають внутрішнім і зовнішнім транспортно-економічним зв'язкам країни, але потребують істотного вдосконалення та модернізації для підвищення якості транспортних послуг, особливо у міжнародному сполученні [12].

М. Когут, Р. Содома, В. Демчина визначають транспортну інфраструктуру призму економічної ефективності, забезпечення якості життєдіяльності, враховуючи перманентні внутрішні й зовнішні зміни [13].

О. Фастовець характеризує її як сукупність шляхів сполучення, засобів перевезення, управління та зв'язку, а також комплекс технічних споруд та пристроїв здатних забезпечити їх функціонування [14].

І. Салдовська визначає транспортну інфраструктуру як комплексну категорію, що характеризується через призму сукупності транспортних підприємств, установ, організацій, які

спрямовують свою діяльність на обмін і рух товарів, що забезпечується через застосування сукупності технічних засобів і устаткування [15].

В. Шемясєв розглядає її як складову частину єдиної транспортної системи, що покликана забезпечити умови її функціонування, завдяки чому створює можливості зміцнення економічної безпеки держави (завдяки забезпеченню реалізації національних економічних інтересів) та гарантує спроможність держави до превентивного захисту від ризиків та загроз у транспортній сфері на національному та міжнародному рівні [16].

Реалізуючи системний підхід, Н. Лавренюк визначає транспортну інфраструктуру як систему обслуговуючих транспортні перевезення та послуги об'єктів і транспортної мережі, що забезпечують здійснення транспортної діяльності у процесі транскордонного співробітництва України та Європейського Союзу в межах транспортної політики ЄС [17]. Подібний підхід реалізовано у розробках [18, 19].

На відміну від попередніх авторів, О. Шестак характеризує транспортну інфраструктуру через призму транспортно-логістичних центрів і транспортно-логістичних ліній [20].

Як сукупність матеріальних, кадрових, організаційних, фінансово-економічних і нормативно-правових умов, які сформовані в країні з метою забезпечення сталого та якісного перевезення пасажирів і доставки вантажів в усіх сферах суспільного відтворювального процесу розглядає транспортну інфраструктуру М. Потєєва [11].

Н. Ткаченко, характеризуючи багатоаспектність поняття, визначає транспортну інфраструктуру як:

- частину загальної інфраструктури, невід'ємний її елемент, головною функцією якого є переміщення вантажів і людей. Цей елемент є тісно взаємозв'язаним з економічними процесами сприяючи їх здійсненню та протіканню. Такий зв'язок виявляється як прямо (наприклад, обслуговування матеріального виробництва, маркетингу товарів і т.п.), так і побічно (наприклад, обслуговування соціальної сфери);

- елемент загальної інфраструктури (будівлі, споруду, пристрої), що забезпечують функціонування та експлуатацію різних видів транспорту (транспортних засобів). Без такої матеріальної бази транспортування вантажів є або неможливим (наприклад, залізничні колії для потягів, станції перекачування нафтопродуктів для нафтопроводів і т.п.), або економічно недоцільним (наприклад, автомобільні дороги для вантажних автомобілів і пасажирських автобусів) [21].

Висновки. Таким чином, транспортна інфраструктура визначається як система транспортних комунікацій, що забезпечує формування пасажиро-вантажних перевезень, та визначається комплексом технічних споруд та пристроїв її функціонування, земельними ресурсами, безпековими параметрами і призводить до безперебійної діяльності кінцевих ланцюгів споживання, враховуючи вплив екологічних чинників.

Виявлені особливості функціонування транспортної інфраструктури, яка характеризується системністю, впливом зовнішніх і внутрішніх чинників, земельних відносин, безпекового стану, екологічних чинників.

Перелік посилань

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках. Постанова Кабінету міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-п#Text>
2. Звіт про непрямі фінансові втрати економіки внаслідок військової агресії Росії проти України станом на 1 липня 2024 року. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/30.09.24_Losses_Report-ua.pdf
3. Войтків П.С., Іванов Є.А. Технології захисту та відновлення ґрунтів: навчально-методичний посібник. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2023. 280 с.

4. Томчук О.Ф. Кожухар В.В. Аналіз ефективності використання земельних ресурсів. Агросвіт. 2019. № 19. С. 38–47. URL: http://www.agrosvit.info/pdf/19_2019/7.pdf
5. Hugo N., Viertel D. The Use of GIS for Land Use Planning: Recommendations for PPGIS in the United States. International Journal on Engineering Science and Technology. 2024. №6(3). Pp. 329–337. DOI: <https://doi.org/10.46328/ijonest.220>
6. Rajesh Vasantrao Wagh, Sharad Karnasaheb Auti. The Role of Geographic Information Systems (GIS) in Land Use Planning. International Journal of Innovations In Science Engineering And Management. 2025. № 4(1). Pp. 366–370. URL: <https://www.researchgate.net/publication/390656149>
7. Al-Taani, A., Al-husban, Y., Farhan, I. Land suitability evaluation for agricultural use using GIS and remote sensing techniques: The case study of Ma'an Governorate, Jordan. Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2021. №24. Pp. 109–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.01.001>
8. Мамонов К.А., Гой В.В., В'яткін Р.С., Ковальчук В.С. Оцінка використання земель із застосуванням методу експертних оцінок у системі територіального розвитку регіонів. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2024. Випуск 210. С. 126–134. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320685>
9. Телюра Н., Коркуц М. Інноваційний підхід до використання комплексних платформ для забезпечення стійкості та екологічної безпеки. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2025. №. 3. С. 42–49. URL: <https://journals.mipolytech.in.ua/index.php/tech/article/view/46>
10. Проскурнін О.А., Юрченко В.О., Цапко Н.С., Мельник С.В., Дем'янова О.О. Забруднення дощової води атмосферним повітрям з урахуванням імовірного характеру метеоумов. Науковий вісник будівництва. 2025. № 112. С. 388–394. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.49>
11. Жовтяк Г.А. Теоретико-методичні підходи до визначення поняття «транспортна інфраструктура регіону». Ефективна економіка. 2011. № 11. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=792>
12. Про затвердження Концепції реформування транспортного сектору економіки. Постанова Кабінету міністрів України від 09.11.2000 р. №1684. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1684-2000-п#Text>
13. Когут М.В., Содомо Р.І., Демчина В.Р. Розвиток транспортної інфраструктури як фактор підвищення глобальної конкурентоспроможності. Економіка та суспільство. 2024. Випуск 60. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/3653/3582>
14. Фастовець О.О. Розвиток транспортної системи з найдавніших часів до початку ХХ ст. як чинник виникнення туристичної галузі. Туристично-краєзнавчі дослідження. 2002. Випуск 4. С. 418–443.
15. Садловська І.П. Стратегічне управління національною транспортною інфраструктурою України: монографія. Київ: ПП «Сердюк В.Л.», 2011. 356 с.
16. Шемясєв В.В. Управління розвитком транспортної інфраструктури в системі економічної безпеки держави: дис. ... д-ра екон. наук: 21.04.01. НІСД. Київ, 2018. 382 с.
17. Лавренюк Н. Поняття транспортної інфраструктури в умовах інтеграційних процесів Україна – ЄС. Юридичний вісник. 2018. № 6. С. 82–88. URL: http://yurvisnyk.in.ua/v4_2018/15.pdf
18. Пирожков С.І. Методичні рекомендації щодо оцінки рівня економічної безпеки України. Київ : НІПНБ, 2003. 42 с.
19. Новікова О.Ф., Покотилєнко Р.В. Економічна безпека: концептуальне визначення та механізми забезпечення: монографія. Донецьк, 2006. 408 с.
20. Шестак О.І. Виробнича інфраструктура: суть, класифікація, специфічні риси у нових умовах господарювання. Продуктивні сили і регіональна економіка. 2003. С. 190–196.
21. Ткаченко Н. Ю. Транспортна інфраструктура: сутність, функції та роль у забезпеченні економічних процесів. Вісник ДонДУЕТ. Серія: Економічні науки. 2006. №4 (32). С. 56–61.

TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN THE GEO-ECOLOGICAL MONITORING SYSTEM FOR LAND RESTORATION

Vatulia Glib, 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>

Radzinska Yuliia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: Yuliia.Radzinska@kname.edu.ua, tel. +380997800049, <https://orcid.org/0000-0002-1661-7975>

Summary. The article defines the relevance of the study, which is determined by the need to ensure the efficient use of transport infrastructure land through the application of modern geoinformation systems. The processes of transport infrastructure land use are affected by the consequences of aggressive military operations.

The work achieves the goal of defining transport infrastructure in the system of geo-ecological monitoring of land restoration. To achieve this goal, the following tasks were solved: substantiation of theoretical provisions for the definition of transport infrastructure; identification of the peculiarities of transport infrastructure functioning.

It has been established that the restoration of transport infrastructure destroyed or damaged as a result of the Russian Federation's armed aggression against Ukraine should, if possible, be carried out at a higher quality level (according to the principle of «build back better»), including taking into account the standards provided for by Ukraine's international legal obligations in the field of European integration, European Union law (EU acquis), in particular standards for transport safety and transport decarbonisation.

To develop geo-ecological monitoring of the use of transport infrastructure land, a quantitative basis is being formed, which is created on the basis of the application of mathematical tools, analytical and expert methods, environmental and spatial support, information parameters and construction support features.

It is proposed to use geographic information systems for the formation and functioning of transport infrastructure.

As a result of the study, transport infrastructure is defined as a system of transport communications that ensures the formation of passenger and freight transport, and is determined by a complex of technical structures and devices for its functioning, land resources, safety parameters, and leads to the uninterrupted operation of end consumption chains, taking into account the influence of environmental factors.

The study identified the characteristics of the functioning of transport infrastructure, which are characterised by systematicity, the influence of external and internal factors, land relations, security conditions, and environmental factors.

Keywords: geo-ecological monitoring, restoration of territories, transport infrastructure land, transport infrastructure.

References

1. On approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030 and approval of the operational plan of measures for its implementation in 2025-2027. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 1550 of 27 December 2024. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-#Text> [in Ukrainian].
2. Report on indirect financial losses to the economy as a result of Russia's military aggression against Ukraine as of 1 July 2024. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/30.09.24_Losses_Report-ua.pdf [in Ukrainian].
3. Voikiv, P., Ivanov, E. (2023) Technologies for soil protection and restoration: teaching and methodological manual. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 280 p.
4. Tomchuk, O., Kozhukhar, V. (2019) Analysis of the efficiency of land resource use. Agrosvit. № 19. P. 38–47. http://www.agrosvit.info/pdf/19_2019/7.pdf [in Ukrainian].

5. Hugo N., Viertel, D. (2024) The Use of GIS for Land Use Planning: Recommendations for PPGIS in the United States. International Journal on Engineering Science and Technology. №6(3). Pp. 329–337. <https://doi.org/10.46328/ijonest.220>
6. Rajesh Vasantrao Wagh, Sharad Karnasaheb Auti (2025) The Role of Geographic Information Systems (GIS) in Land Use Planning. International Journal of Innovations In Science Engineering And Management. № 4(1). Pp. 366–370. <https://www.researchgate.net/publication/390656149>
7. Al-Taani, A., Al-husban, Y., Farhan, I. (2021) Land suitability evaluation for agricultural use using GIS and remote sensing techniques: The case study of Ma'an Governorate, Jordan. Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. №24. Pp. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.01.001>
8. Mamonov, K., Goi, V., Viatkin, R., Kovalchuk, V. (2024) Assessment of land use with the application of expert assessment methods in the system of territorial development of regions. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. Issue 210. Pp. 126–134. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320685> [in Ukrainian].
9. Telyura, N., Korkuts, M. (2025) An innovative approach to the use of integrated platforms to ensure sustainability and environmental safety. Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences. № 3. Pp. 42–49. <https://journals.mipolytech.in.ua/index.php/tech/article/view/46> [in Ukrainian].
10. Proskurnin, O., Yurchenko, V., Tsapko, N., Melnik, S., Demyanova, O. (2025) Pollution of rainwater by atmospheric air, taking into account the probable nature of weather conditions. Scientific Bulletin of Construction. № 112. Pp. 388–394. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.49> [in Ukrainian].
11. Zhovtyak, G. (2011) Theoretical and methodological approaches to defining the concept of «regional transport infrastructure». Effective Economy. № 11. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=792> [in Ukrainian].
12. On approval of the Concept of Reforming the Transport Sector of the Economy. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 09.11.2000 № 1684. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1684-2000-п#Text> [in Ukrainian].
13. Kogut, M., Sodoma, R., Demchina, V. (2024) Development of transport infrastructure as a factor in increasing global competitiveness. Economy and Society. Issue 60. <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/3653/3582> [in Ukrainian].
14. Fastovets, O. (2002) Development of the transport system from ancient times to the beginning of the 20th century as a factor in the emergence of the tourism industry. Tourism and Local History Studies. Issue 4. Pp. 418–443.
15. Sadlovska, I. (2011) Strategic Management of Ukraine's National Transport Infrastructure: Monograph. Kyiv: PP «Serdyuk V.L. №, 356 p.
16. Shemaiev, V. (2018) Management of transport infrastructure development in the system of economic security of the state: dissertation ... Doctor of Economic Sciences: 21.04.01. NISD. Kyiv, 382 p.
17. Lavrenyuk, N. (2018) The concept of transport infrastructure in the context of Ukraine-EU integration processes. Legal Gazette. № 6. P. 82–88. http://yurvisnyk.in.ua/v4_2018/15.pdf [in Ukrainian].
18. Pirozhkov, S. (2003) Methodological recommendations for assessing the level of economic security in Ukraine. Kyiv: NIPNB, 42 p.
19. Novikova, O., Pokotilenko, R. (2006) Economic security: conceptual definition and mechanisms of ensuring: monograph. Donetsk, 408 p.
20. Shestak, O. (2003) Production infrastructure: essence, classification, specific features in new economic conditions. Productive forces and regional economy. P. 190–196.
21. Tkachenko, N. (2006) Transport infrastructure: essence, functions and role in ensuring economic processes. Bulletin of DonDUET. Series: Economic Sciences. № 4 (32). P. 56–61.

Дата надходження до редакції 08.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 1.03.2026.

УДК 528:332.3
UDC 528:332.3

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-114-120

**ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВІДБУДОВИ ЗЕМЕЛЬ
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ: ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ**

**DEFINITION OF GEO-ECOLOGICAL MONITORING OF LAND RESTORATION IN
TRANSPORT INFRASTRUCTURE: THEORETICAL APPROACHES**



Юрченко Валентина Олександрівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: yurchenko.valentina@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7123-710X>



Телюра Наталія Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, Начальник науково-дослідної частини, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: Natalya.Telyura@kname.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0003-0732-7789>



Кватадзе Аліна Іродіонівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: kvatadze_alina@ukr.net, тел. +380662100191.

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

Анотація. Визначена актуальність теми дослідження. У роботі досягнута мета дослідження відносно обґрунтування теоретичних підходів до визначення геоекологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури.

Запропоновані теоретичні підходи: функціональний: визначаються напрями та особливості розробки геоекологічного моніторингу; нормативно-правовий: обґрунтовуються нормативно-правові аспекти формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель на відбудову транспортної інфраструктури регіонів; екологічний: фокусується увага на екологічних напрямках здійснення моніторингових процедур; стейхолдерний: характеризується рівень та особливості взаємодії зацікавлених осіб щодо розробки й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель на відбудову транспортної інфраструктури регіонів; моніторинговий: визначаються напрями та особливості здійснення моніторингових процедур; структурний: виокремлюються структурні елементи геоекологічного моніторингу використання земель на відбудову транспортної

інфраструктури регіонів; системний: розглядається геоекологічний моніторинг як сукупність земельних, екологічних, транспортних і безпекових чинників, що забезпечують реалізацію моніторингових процедур і взаємодію стейкхолдерів для підвищення ефективності використання земель на відбудову транспортної інфраструктури.

Узагальнюючи теоретико-методологічні підходи й у результаті систематизації нормативно-правового забезпечення, запропоновано визначення геоекологічного моніторингу використання земель для відбудови як система, що складається із земельних, екологічних, транспортних і безпекових чинників, які формують кількісну основу здійснення моніторингу із застосуванням математичних методів і моделей, геодезичного й геоінформаційного забезпечення, що дозволяє підвищити ефективність використання земель на відбудову транспортної інфраструктури, враховуючи рівень та особливості взаємодії стейкхолдерів.

Ключові слова: геоекологічний моніторинг, відбудова територій, землі транспортної інфраструктури, оцінка.

Вступ. Сучасні напрями розвитку як держави, так і регіонів потребують забезпечення ефективності відбудови земель транспортної інфраструктури як важливого ланцюга, що формує логістичну структуру й мережу. Поряд з цим, за останні роки поглиблюються проблемні аспекти відносно порушення об'єктів земельно-майнового комплексу транспортної інфраструктури внаслідок ведення агресивних бойових дій. Знижується екологічна безпека, зростають екологічні проблеми, втрати. У цьому контексті виникає необхідність формування й застосування геоекологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури.

Огляд існуючих теоретичних розробок. Проблемні питання та особливості реалізації геоекологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури визначені у роботах [1, 2].

Функціональні аспекти формування та застосування моніторингу транспортної інфраструктури визначені у розробках [3, 4]. На інтелектуальних інструментах забезпечення функціонування транспортної інфраструктури фокусується увага у [5]. Для розвитку транспортної інфраструктури формується й реалізується державна інтегрована інформаційна система забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження).

Для забезпечення моніторингу функціонування транспортної інфраструктури запропоновані інтелектуальні моніторингові системи. У цьому контексті визначена розробка [6].

Метою дослідження є обґрунтування теоретичних підходів до визначення геоекологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. Для підвищення ефективності відбудови земель транспортної інфраструктури особливого значення має формування й реалізація моніторингових інструментів. Таким чином особливого значення має визначення геоекологічного моніторингу відбудови земель транспортної інфраструктури.

Слід вказати на важливість екологічного моніторингу, який розглядається як система спостережень, оцінки та прогнозування стану довкілля, його компонентів (повітря, вода, ґрунт, біорізноманіття) та антропогенного впливу, що включає фоновий, біологічний, медико-екологічний та інші види спостережень, які забезпечуються державною системою моніторингу з метою інформаційної підтримки управління охороною природи. На формуванні функціональних напрямів і законодавчого забезпечення зосереджується увага у роботах [7, 8].

Визначено державний, громадський, самоврядний, виробничий контроль, який через показники оцінки забруднення атмосферного повітря, поверхневих і морських вод, ґрунту здійснюється екологічний моніторинг [9].

Державна система моніторингу довкілля визначається як система спостережень, збирання, оброблення, аналізу, зберігання та обміну інформацією про стан довкілля, вплив на нього, прогнозування його змін та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття

ефективних управлінських рішень в Україні з метою забезпечення досягнення Цілей сталого розвитку. Державна система моніторингу довкілля включає такі підсистеми:

- моніторинг атмосферного повітря;
- моніторинг вод;
- моніторинг земель і ґрунтів;
- моніторинг лісів;
- моніторинг біологічного та ландшафтного різноманіття;
- моніторинг у сфері управління відходами;
- моніторинг геологічного середовища;
- моніторинг впливу фізичних факторів (температура, шум, вібрація, іонізуюче та неіонізуюче випромінювання) [10].

Таблиця 1 – Характеристика технологічних рішень і засоби здійснення цифрового моніторингу [9]

Table 1 – Characteristics of technological solutions and means of digital monitoring [9]

Технологічні рішення і засоби	Характеристика
Платформа WaterBot	цифрова платформа, розроблена для моніторингу якості води. Вона включає в себе набір датчиків, які вимірюють різні параметри, такі як pH-рівень, температура, розчинений кисень, електрична провідність та інші. Дані з цих датчиків передаються до централізованої системи, де вони аналізуються та візуалізуються для операторів системи моніторингу. WaterBot надає зручний спосіб контролювати якість води та реагувати на зміни у реальному часі.
Сенсори для вимірювання концентрації речовин	Деякі цифрові сенсори спеціально призначені для вимірювання концентрації різних речовин у воді. Наприклад, сенсори на основі фотометрії можуть вимірювати концентрацію амонію, нітратів, фосфатів та інших хімічних сполук у воді. Ці сенсори зазвичай підключаються до цифрових платформ або систем моніторингу, де дані аналізуються та використовуються для оцінки якості води.
Датчики розташування та геопросторового моніторингу	Деякі цифрові платформи використовують GPS-датчики для вимірювання місцезнаходження та геопросторового розташування джерел води. Це дозволяє точно визначати місце забору проб та встановлення датчиків, що сприяє точному визначенню походження забруднень та аналізу зони впливу на якість води.
Датчики розташування та геопросторового моніторингу	Деякі цифрові платформи використовують GPS-датчики для вимірювання місцезнаходження та геопросторового розташування джерел води. Це дозволяє точно визначати місце забору проб та встановлення датчиків, що сприяє точному визначенню походження забруднень та аналізу зони впливу на якість води

Моніторинг геологічного середовища здійснюється державною геологічною службою України в порядку, встановленому Кабінетом Міністрів України. Моніторинг геологічного середовища є складовою державної системи моніторингу довкілля. З метою інформаційного забезпечення прийняття управлінських рішень, забезпечення прозорості даних та обміну інформацією щодо стану геологічного середовища, а також інших інформаційних потреб управління у сфері охорони та раціонального користування надрами використовуються сучасні інформаційні технології, зокрема автоматизовані інформаційні системи у сфері охорони та раціонального користування надрами. У межах інформації, що отримується у сфері охорони та раціонального користування надрами і використовується для інформаційних потреб управління в галузі охорони навколишнього природного середовища, у встановленому Кабінетом Міністрів України порядку забезпечується технологічна сумісність та здійснюється інформаційна взаємодія автоматизованих інформаційних систем у сфері охорони та

раціонального користування надрами із загальнодержавною екологічною автоматизованою інформаційно-аналітичною системою забезпечення прийняття управлінських рішень та доступу до екологічної інформації та з її мережею [10].

Моніторинг земель – це система спостереження за станом земель з метою своєчасного виявлення змін, їх оцінки, відвернення та ліквідації наслідків негативних процесів. У системі моніторингу земель проводиться збирання, оброблення, передавання, збереження та аналіз інформації про стан земель, прогнозування їх змін і розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень щодо запобігання негативним змінам стану земель та дотримання вимог екологічної безпеки. Моніторинг земель є складовою частиною державної системи моніторингу довкілля. Залежно від цілей, спостережень і охоплення територій моніторинг земель може бути національним, регіональним і локальним. Ведення моніторингу земель здійснюється центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері земельних відносин, центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері охорони навколишнього природного середовища [16].

Висновки. Отже, обґрунтовані теоретичні положення щодо визначення геоекологічного моніторингу використання земель на відбудову транспортної інфраструктури регіонів та сформовано відповідний категоріальний апарат на основі запропонованих науково-практичних підходів:

- функціональний: визначаються напрями та особливості розробки геоекологічного моніторингу;
- нормативно-правовий: обґрунтовуються нормативно-правові аспекти формування й застосування геоекологічного моніторингу використання земель на відбудову транспортної інфраструктури регіонів;
- екологічний: фокусується увага на екологічних напрямках здійснення моніторингових процедур;
- стейкхолдерний: характеризується рівень та особливості взаємодії зацікавлених осіб щодо розробки й реалізації геоекологічного моніторингу використання земель на відбудову транспортної інфраструктури регіонів;
- моніторинговий: визначаються напрями та особливості здійснення моніторингових процедур;
- структурний: виокремлюються структурні елементи геоекологічного моніторингу використання земель на відбудову транспортної інфраструктури регіонів;
- системний: розглядається геоекологічний моніторинг як сукупність земельних, екологічних, транспортних і безпекових чинників, що забезпечують реалізацію моніторингових процедур і взаємодію стейкхолдерів для підвищення ефективності використання земель на відбудову транспортної інфраструктури.

На основі обґрунтування теоретико-методологічних підходів, нормативно-правового забезпечення сформовані елементи інформаційно-аналітичного забезпечення щодо формування та реалізації геоекологічного моніторингу використання земель на відбудову транспортної інфраструктури регіонів. Це надає можливості для побудови багаторівневої системи показників оцінки для геоекологічного моніторингу й розробки методу оцінки.

Узагальнюючи теоретико-методологічні підходи й у результаті систематизації нормативно-правового забезпечення, запропоновано визначення геоекологічного моніторингу використання земель для відбудови як система, що складається із земельних, екологічних, транспортних і безпекових чинників, які формують кількісну основу здійснення моніторингу із застосуванням математичних методів і моделей, геодезичного й геоінформаційного забезпечення, що дозволяє підвищити ефективність використання земель на відбудову транспортної інфраструктури, враховуючи рівень та особливості взаємодії стейкхолдерів.

Перелік посилань

1. Мамонов К.А., В'яткін Р.С., Чайка Т.М. Визначення геопросторового забезпечення використання земель промисловості на регіональному рівні. Комунальне господарство міст. 2025. Том 1. Вип. 189. С. 331–338. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6486/6406>
2. Мамонов К.А., Гой В.В., Телюра Н.О., Нелін Є.О. Напрями формування екологічного забезпечення використання земель для відбудови транспортної інфраструктури на регіональному рівні. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2025. Вип. 117. Ч. 1. С. 116–123. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.1/116.pdf
3. Гасанов Р.З., Іванов О.П. Адаптивне проріджування потоку даних у системах дистанційного моніторингу об'єктів транспортної інфраструктури. International scientific and technical conference Information Technologies in Metallurgy and Machine building – ITMM 2025. С. 193–198. URL: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/2095/1325>
4. Liashenko D., Belenok V., Spitsa R., Pavlyuk D. Landslide GIS modelling with QGIS software. XIV International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», 10–13 November 2020, Kyiv. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056069>
5. Fan Y., Khattak A.J., Shay E. Intelligent Transportation Systems: What Do Publications and Patents Tell Us? Journal of Intelligent Transportation Systems. 2007. №11(2), Pp. 91–103. DOI: <https://doi.org/10.1080/15472450701301081>
6. Miroshnik M. Implementation of cryptographic algorithms on FPGA-based digital distributed systems. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2015. № 2. С. 25–36. URL: <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/51936>
7. Гетьман А.П. Екологічне право: підручник. Харків: Право, 2019. 552 с.
8. Bigun T., Poltavets F., Tulina E. Environmental audit in Ukraine: ways for solving some problems. Entrepreneurship, Economy and Law. 2020. № 11. P. 92–97. DOI: <https://doi.org/10.32849/2663-5313/2020.11.15>
9. Самусевич Я.В., Теницька І.А., Новикова Д.А. Екологічний контроль, моніторинг та аудит: нормативно-правове забезпечення та механізм реалізації в Україні. Сталый розвиток економіки. 2023. № 2. С. 196–202. DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-47-28>
10. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля. Закон України. Документ 2973-IX від 20.03.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text>
11. Khan U.T. A review of water quality monitoring and analysis methods. Water Science and Technology. 2019. № 79(6). Pp. 1103–1117.
12. Sukhija M., Chopra A. Internet of Things (IoT)-enabled water quality monitoring systems. Environmental Science and Pollution Research. 2019. №26(6). Pp. 5456–5472.
13. 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
14. Mamonov K., Bieliatynskiy 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. URL: <https://sciendo.com/article/10.2478/cee-2025-0072>
15. Guo L., Xiao L., Tang X., Hu Z. Application of GIS and remote sensing techniques for water resources management. Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT), 2010 International Conference on. Volume 2. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESIAT.2010.5568931>
16. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо діяльності Міністерства аграрної політики та продовольства України, Міністерства соціальної політики України, інших центральних органів виконавчої влади, діяльність яких спрямовується та координується через відповідних міністрів. Закон України. Документ 5462-VI від 01.01.2026. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5462-17/#Text>

DEFINITION OF GEO-ECOLOGICAL MONITORING OF LAND RESTORATION IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE: THEORETICAL APPROACHES

Valentyna Iurchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Urban Environmental Engineering and Management, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: yurchenko.valentina@gmail.com, tel. +380977933804, <https://orcid.org/0000-0001-7123-710X>

Natalia Teliura, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Research Department O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: natalya.telyura@kname.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-0732-7789>

Alina Kvatadze, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of the Department of road construction materials and chemistry, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kvatadze_alina@ukr.net, tel.+380662100191, <https://orcid.org/0000-0001-8174-7728>.

Summary. The relevance of the research topic has been determined. The work has achieved the research goal of substantiating theoretical approaches to defining geoecological monitoring of the restoration of transport infrastructure lands.

The following theoretical approaches are proposed: functional: the directions and features of the development of geo-ecological monitoring are determined; regulatory and legal: the regulatory and legal aspects of the formation and application of geo-ecological monitoring of land use for the restoration of transport infrastructure in regions are substantiated; ecological: focuses on the ecological directions of monitoring procedures; stakeholder: characterises the level and features of interaction between interested parties in the development and implementation of geo-ecological monitoring of land use for the restoration of transport infrastructure in regions; monitoring: determines the areas and characteristics of monitoring procedures; structural: identifies the structural elements of geo-ecological monitoring of land use for the reconstruction of regional transport infrastructure; systemic: geo-ecological monitoring is considered as a set of land, environmental, transport and security factors that ensure the implementation of monitoring procedures and the interaction of stakeholders to improve the efficiency of land use for the reconstruction of transport infrastructure.

Summarising theoretical and methodological approaches and as a result of systematising regulatory and legal support, it is proposed to define geo-ecological monitoring of land use for reconstruction as a system consisting of land, environmental, transport and security factors that form the quantitative basis for monitoring using mathematical methods and models, geodetic and geoinformation support, which allows for more efficient land use for the reconstruction of transport infrastructure, taking into account the level and characteristics of stakeholder interaction.

Keywords: geo-ecological monitoring, reconstruction of territories, land transport infrastructure, assessment.

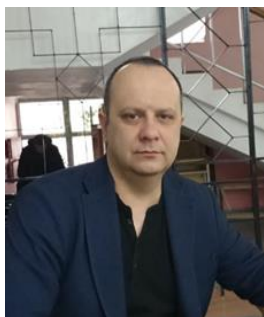
References

1. Mamonov, K., Viatkin, R., Chaika, T. (2025) Determination of geospatial support for industrial land use at the regional level. Communal Economy of Cities. Volume 1. Issue 189. Pp. 331–338. <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6486/6406> [in Ukrainian].
2. Mamonov, K, Goi, V., Telyura, N., Nelin, E. (2025) Directions for the formation of ecological support for land use for the reconstruction of transport infrastructure at the regional level. Automobile roads and road construction. Issue 117. Part 1. Pp. 116–123. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/117.1/116.pdf [in Ukrainian].
3. Gasanov, R., Ivanov, O. (2025) Adaptive thinning of data flow in remote monitoring systems for transport infrastructure facilities. International scientific and technical conference Information Technologies in Metallurgy and Machine Building – ITMM 2025. P. 193–198. <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/2095/1325> [in Ukrainian].

4. Liashenko, D., Belenok, V., Spitsa, R., Pavlyuk, D. (2020) Landslide GIS modelling with QGIS software. XIV International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», 10–13 November 2020, Kyiv. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056069> [in Ukrainian].
5. Fan, Y., Khattak, A.J., Shay, E. (2007) Intelligent Transportation Systems: What Do Publications and Patents Tell Us? Journal of Intelligent Transportation Systems. №11(2), Pp. 91–103. <https://doi.org/10.1080/15472450701301081>
6. Miroshnik, M. (2015) Implementation of cryptographic algorithms on FPGA-based digital distributed systems. Information and control systems in railway transport. № 2. Pp. 25–36. <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/51936>
7. Hetman, A. (2019) Environmental Law: Textbook. Kharkiv: Pravo. 552 p.
8. Bigun, T., Poltavets, F., Tulina, E. (2020) Environmental audit in Ukraine: ways for solving some problems. Entrepreneurship, Economy and Law. № 11. P. 92–97. <https://doi.org/10.32849/2663-5313/2020.11.15> [in Ukrainian].
9. Samusevich, Y., Tenitskaya, I., Novikova, D. (2023) Environmental control, monitoring and auditing: regulatory and legal support and implementation mechanism in Ukraine. Sustainable economic development. № 2. Pp. 196–202. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-47-28> [in Ukrainian].
10. On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding the State System of Environmental Monitoring, Information on the State of the Environment (Environmental Information) and Information Support for Environmental Management. Law of Ukraine. Document 2973-IX of 20 March 2023. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text> [in Ukrainian].
11. Khan, U.T. (2019) A review of water quality monitoring and analysis methods. Water Science and Technology. № 79(6). Pp. 1103–1117.
12. Sukhija, M., Chopra, A. (2019) Internet of Things (IoT)-enabled water quality monitoring systems. Environmental Science and Pollution Research. №26(6). Pp. 5456–5472.
13. Mamonov, K., Radzinska, Yu., Frolov, V., Evdokimov, 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].
14. 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://sciendo.com/article/10.2478/cee-2025-0072>
15. Guo, L., Xiao, L., Tang, X., Hu, Z. (2010) Application of GIS and remote sensing techniques for water resources management. Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT), International Conference on. Volume 2. <https://doi.org/10.1109/ESIAT.2010.5568931>
16. On amendments to certain legislative acts of Ukraine regarding the activities of the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine, the Ministry of Social Policy of Ukraine, and other central executive bodies whose activities are directed and coordinated through the relevant ministers. Law of Ukraine. Document 5462-VI dated 01.01.2026. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5462-17/#Text> [in Ukrainian].

Дата надходження до редакції 19.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 17.01.2026.

METHODS OF COMPENSATION OF IONOSPHERIC DELAY OF GNSS SIGNALS:
COMPARISON AND PROSPECTS OF APPLICATIONМЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ ІОНОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ GNSS-СИГНАЛІВ: ПОРІВНЯННЯ
ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

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: Oleksii.voronkov@kname.edu.ua

<http://orcid.org/0000-0001-6905-0098>



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: ppoosshhtaa@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0001-8305-6269>



Маслій Любов Олексіївна, завідувач лабораторії, старший викладач 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. Метою статті є узагальнення, систематизація та порівняльний аналіз сучасних методів корекції іоносферних поправок у глобальних навігаційних супутникових системах (GNSS), визначення їх ефективності, особливостей застосування, переваг та недоліків, а також оцінювання можливостей компенсації іоносферної затримки у завданнях координатних визначень.

Подано узагальнення результатів наукових досліджень щодо існуючих методів компенсації іоносферної затримки, серед яких найпоширенішими є емпіричні, математичні та комбіновані підходи. Особливу увагу приділено використанню карт глобального повного електронного вмісту GIM, показано, що такі карти дозволяють компенсувати до 90–95 % іоносферної затримки, тоді як регіональні моделі TEC, побудовані на основі щільних мереж локальних станцій, дають змогу підвищити точність позиціонування ще на 30–50 % завдяки високій просторово-часовій роздільності та адаптивності до локальних умов.

Результати проведеного аналізу свідчать, що ефективність компенсації іоносферних затримок залежить від обраного методу, типу приймача та умов спостережень. Для завдань високоточного

координатного забезпечення оптимальним є поєднання двочастотних спостережень з використанням регіональних моделей TEC або карт GIM IONEX, тоді як для оперативної навігації доцільно застосовувати математичні моделі часових рядів та системи супутникового доповнення SBAS.

Отже, подальший розвиток методів моделювання іоносфери має бути спрямований на інтеграцію регіональних та глобальних іоносферних моделей із системами реального часу, що дозволить забезпечити стабільну та високу точність GNSS-позиціонування у широкому спектрі геодезичних і навігаційних завдань.

Ключові слова: GNSS-технології, похибки GNSS-вимірів, іоносфера Землі, іоносферна рефракція, глобальна іоносферна карта, регіональна модель TEC, супутникова геодезія, математична обробка геодезичних даних, складні системи.

Вступ. Системи глобальної навігації (GNSS) є ключовими інструментами для високоточного позиціонування, навігації та синхронізації часу в різних сферах, включаючи транспорт, геодезію, авіацію та наукові дослідження. Однак точність GNSS сигналів суттєво знижується через іоносферну затримку, яка спричинена взаємодією радіосигналів із зарядженими частинками в іоносфері. Ця затримка залежить від частоти сигналу, стану іоносфери, часу доби, географічного розташування та сонячної активності, що ускладнює прогнозування та компенсацію. Іоносферна затримка призводить до помилок у визначенні координат, які можуть досягати кількох метрів, що є критичним для застосувань, де потрібна висока точність (наприклад у геодезії або автономному транспорті). Існуючі методи корекції мають обмеження, зокрема високу вартість обладнання, залежність від зовнішніх джерел даних або недостатню точність у регіонах із високою іоносферною активністю.

Таким чином, існує проблема розробки ефективних, економічно доступних та універсальних методів усунення впливу іоносферної затримки сигналів GNSS, які б забезпечували високу точність позиціонування в реальному часі для широкого спектра застосувань. Покращення розуміння цієї проблеми потребує проведення огляду існуючих методів корекції іоносферних поправок, а також наявних моделей параметрів іоносферного шару Землі, визначення особливостей їх використання, переваг та недоліків, оцінювання ефективності підходів компенсації впливу іоносферної затримки у вирішенні завдань координатних визначень як у реальному часі, так і під час постобробки. Крім того, особливим питанням є застосовування інструментарію супутникової геодезії для формування просторового забезпечення складних територіальних систем. Проблемним залишається формування інформаційного забезпечення супутникової геодезії, які застосовуються для математичної обробки геодезичних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив іоносферного шару Землі на параметри радіосигналів на шляху їх проходження через іоносферу зумовлює велику увагу вчених до вивчення її стану. Дослідженням процесів, що відбуваються у шарі іоносфери, займається ряд провідних зарубіжних університетів і дослідницьких інститутів. В Україні роботи з вирішення цієї проблеми проводять такі провідні установи, як Інститут космічних досліджень, Інститут іоносфери, Радіоастрономічний інститут, а також Інститут радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова. Автори багатьох наукових робіт відзначають, що вплив іоносфери на радіосигнали є переважаючим джерелом похибок GNSS сигналів, до того ж складність їх точного врахування пов'язана з труднощами створення адекватної моделі стану іоносфери у зв'язку із суттєвою нестійкістю її параметрів [1–5]. Більшість пропонуєваних моделей повного електронного вмісту ПЕВ (Total Electron Content TEC) ґрунтуються на результатах GNSS-спостережень, що опрацьовані за допомогою спеціального математичного апарату [1–12]. Найпоширенішою моделлю компенсації іоносферної затримки є відома модель Klobuchar, що застосовується у одночастотних GNSS-приймачах. Ця модель ґрунтується на даних навігаційного повідомлення супутників та, враховуючи добову зміну TEC, забезпечує усунення близько 50 % від похибки вимірювання псевдовіддалі. Пропонуються моделі, що підвищують ефективність моделі Klobuchar, зокрема NTCM та NeQuick. Дослідження моделі NTCM, що ґрунтується на отриманих за моделлю Klobuchar даних, показали кращу її продуктивність. Отримані за цією моделлю значення середньої квадратичної похибки (Root Mean Square Error, RMSE) позиціонування менші на 0,24 м під

час спокійного стану іоносфери і на 0,45 м під час збуреного стану порівняно з моделлю Klobuchar [8]. Кліматологічна модель NeQuick з її модифікацією NeQuick 2 надає типові середні параметри іоносфери і дані про вертикальний та похилий вміст електронів шляхом формування 3D-специфікації електронної щільності іоносфери. Практичне використання моделі для супутникової навігації та позиціонування показало, що модель NeQuick має кращі характеристики, ніж модель Klobuchar, у 98 % тестів модель забезпечила кращу оцінку іоносферної затримки [13].

Автори робіт [1, 4, 10] відзначають ефективність застосування математичного апарату часових рядів, що забезпечує короткочасне прогнозування змін параметра TEC, вплив факторів сезонності, а отже вищу точність розв'язків у завданнях координатних визначень.

Найбільше ефективним розв'язанням завдання із усунення іоносферної затримки є застосування двочастотних GNSS-приймачів із безіоносферною лінійною комбінацією спостережень обох частот. Кращі результати за точністю надає використання фазових GNSS-спостережень, але цей метод вимагає надійного вирішення фазових неоднозначностей, що одночасно ускладнює розв'язання задачі [6]. Авторами [10] визначені переваги й недоліки низки методів обчислення параметрів іоносфери за результатами двочастотних GNSS спостережень. У статті [1] розглянуто методи корекції іоносферних поправок із використанням для координатних визначень одно- та двочастотних приймачів. Відзначено, що використання двочастотних кодових вимірювань забезпечує істотно меншу оцінку RMSE порівняно з одночастотними.

Для врахування іоносферних спотворень застосовують емпіричні іоносферні моделі, а також карти ПЕВ, які є основним параметром для опису й характеристики стану іоносфери. Емпірична іоносферна модель (IRI), рекомендована Міжнародною спілкою радіонаукових досліджень (URSI) як базова модель прогнозування поширення радіохвиль. Модель IRI побудована на підставі експериментальних даних за такими методами радіозондування іоносфери, як вертикальне наземне і супутникове, а також некогерентне розсіювання [14, 15]. Модель IRI забезпечує визначення ПЕВ та середньомісячні значення електронної щільності, температури, а також іонний склад на висотах 50-2000 км. Авторами [11] розроблено нелінійні моделі TEC для чотирьох віддалених станцій, розташованих у Канаді, Китаї, Австралії та Антарктиді, що побудовані на підставі GNSS -даних за допомогою нелінійного методу найменших квадратів. Аналіз показує істотне покращення точності значень та гарне узгодження зі GNSS -спостереженнями TEC у різних регіонах, що відрізняються за широтою, а також перевищують за точністю дані моделі IRI-2016.

Низка робіт [2, 3, 7, 16] присвячена побудові регіональних просторово-часових моделей ПЕВ з високою роздільною здатністю для забезпечення точного оцінювання цього параметра з метою усунення іоносферної затримки з GNSS-вимірювань. Стаття [7] містить розроблену методику обчислення такого параметру іоносфери як загальна електронна концентрація, що ґрунтується на використанні спеціально створеного алгоритму згладжування кодових GNSS спостережень фазовими у режимі реального часу. Методику апробовано для визначення загальної електронної концентрації за даними перманентної станції RVNE, що належить до складу мережі ZAKPOS/UA-EUPOS. У [16] запропоновано алгоритм побудови просторово-часової моделі параметра іоносфери VTEC. Модель створена на підставі низки значень іонізаційного параметра, отриманих з постійних станцій мережі ZAKPOS, має високу роздільну здатність і забезпечує стандартне відхилення модельованих значень параметра VTEC від його вимірних значень, яке не перевищує 1 TECU.

Метою дослідження є огляд існуючих методів корекції іоносферних поправок, визначення особливостей їх використання, переваг та недоліків і порівняння ефективності методів компенсації впливу іоносферної затримки у розв'язанні завдань координатних визначень.

Виклад основного матеріалу. Вирішення багатьох завдань у різних галузях діяльності людини ґрунтуються на даних, отриманих за допомогою GNSS. Доступність, швидкість та зручність використання GNSS технології зумовили їх поширення, а безперервний розвиток та вдосконалення забезпечують користувачів все досконалішими за якістю даними. Якість інформації характеризується, перед усім, її достовірністю і точністю. Відомо, що на шляху розповсюдження супутникові радіосигнали піддаються множині різних впливів, що спричинює похибки. Джерела похибок прийнято

поділяти на три групи: помилки супутника, помилки приймача та помилки поширення. До помилок поширення відносять спотворення супутникових радіосигналів під час їх проходження крізь шари атмосфери Землі, серед яких, як найбільше характерні, виділяють тропосферу (до 9-17 км над поверхнею Землі), тропопаузу (до 50 км), стратосферу (50-55 км) та іоносферу (50-1500 км), які відрізняються фізичними властивостями, а отже чинять різний вплив на GNSS-сигнали. Причому вплив тропосфери, тропопаузи і стратосфери об'єднують у тропосферну рефракцію, що спричинена взаємодією електромагнітних хвиль радіосигналу з атомами і молекулами цього шару, які викривляють шлях та зменшують швидкість проходження сигналу внаслідок зміни коефіцієнта заломлення середовища. Отже радіосигнал запізнюється щодо часу його проходження із швидкістю у вакуумі. Тропосфера є недиспергувальним середовищем, тобто тропосферна рефракція не залежна від частоти радіосигналу.

З шаром іоносфери справа складніша, іоносфера є переважаючим джерелом похибок супутникових спостережень, іоносферна затримка може становити від кількох до десятків метрів [1, 2]. Крім того, шару іоносфери Землі властива нестабільність стану, який, у першу чергу, визначається динамічністю процесів, що відбуваються на Сонці, а також піддається впливу енергії, яку виділяє поверхня Землі внаслідок землетрусів, вибухів, запусків космічних апаратів, потужних техногенних катастроф тощо [2], залежить від сезонності та від широти місцевості [7]. Зростання вимог до точності позиціонування і навігації зумовлює необхідність вдосконалення вже наявних методів і розроблення нових підходів та алгоритмів оцінювання іоносферної затримки радіосигналів. Це вимагає розуміння особливостей фізичних процесів, що відбуваються у шарах атмосфери [4, 8].

Радіосигнал супутника під час проходження через земну атмосферу взаємодіє з її зарядженими частинками, нейтральними атомами і молекулами, внаслідок чого їхня швидкість і напрямок поширення змінюються. Найбільший вплив на радіосигнал надає шар іоносфери, який відрізняє наявність вільних електронів та іонів [1, 6]. *Фізичний процес впливу іоносфери полягає у такому.* Під дією сонячної радіації молекули газу розкладаються на іони та вільні електрони, що відбувається у денний час доби. Вночі вільні іони та електрони рекомбінують, а отже їх концентрація зменшується. Крім того, щільність вільних заряджених частинок в іоносфері залежна від сонячної активності, тобто від інтенсивності процесів, що відбуваються на Сонці. Отже, щільність вільних заряджених частинок у шарі іоносфери постійно змінюється. Іонізований шар іоносфери є диспергувальним середовищем, тобто різні частоти радіосигналів піддаються різному спотворенню на шляху поширення, що залежить від щільності заряджених частинок в іоносфері та частоти радіосигналу. Щільність вільних заряджених частинок іоносфери характеризують спеціальним чинником - повним електронним вмістом ПЕВ (Total Electron Content TEC), числове значення якого (1) дорівнює кількості електронів, що містять стовп газу, перетин якого дорівнює 1 м²:

$$TEC = \int_S^R n_e(s) ds, \quad (1)$$

де $n_e(s)$ – щільність вільних електронів на шляху радіосигналів від супутника S до GNSS-приймача R .

Відстань, що проходить радіосигнал від супутника, становить від 20000 км, коли супутник у зеніті, до приблизно 26000 км, коли супутник сходить або заходить. Як одиницю виміру параметра TEC прийнято TEC Units (TECU), що вважають рівною $TECU = 10^{16}$ електронів/м².

Шлях проходження радіосигналів через іоносферу у напрямку зеніту є найкоротшим, а ПЕВ на цьому шляху – найменший, його називають вертикальним параметром TEC і позначають VTEC (Vertical TEC). Розрізняють також похилі значення ПЕВ, що позначають STEC (Slant TEC).

Для діапазону частот L1 і L2 іоносфера є диспергувальним середовищем і чинить на радіосигнал супутника істотний вплив. Іоносферна рефракція залежна від концентрації електронів та обернено-пропорційна квадрату частоти, отже, радіосигнал має випередження за фазою $\Delta\phi$ (2) та іоносферну затримку для псевдовіддалі за кодами $\Delta\rho$ (3), що прямо пропорційні параметру TEC:

$$\Delta_{\Phi} = -\frac{40,3TEC}{f^2}; \quad (2)$$

$$\Delta_P = \frac{40,3TEC}{f^2}, \quad (3)$$

де TEC – загальний вміст електронів, електронів/м²; f – частота сигналу, Гц.

Похибе значення іоносферної затримки обчислюють за вертикальною затримкою (4):

$$\Delta_{STEC} = \Delta_{VTEC} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2 \beta}}, \quad (4)$$

де β – кут, під яким супутник видимий приймальною антеною.

Як відомо, радіосигнал являє собою спектр різних частот, отже його спектральні складники спотворюються по-різному, і виникають різниці затримок між частотами радіосигналу.

Оскільки вплив сонячної радіації визначається інтенсивністю процесів, що відбуваються на Сонці, моделювання і прогнозування стану іоносфери утруднено. Останніми роками завдяки розвитку глобальних навігаційних супутникових систем та їх широкому застосуванню реалізується можливість визначення параметрів іоносфери за результатами аналізу радіосигналів супутників, що істотно зменшило матеріальні і часові затрати на дослідження іоносфери та сприяло розробленню відповідних методик для розрахунку її параметрів з метою усунення з супутникових спостережень іоносферної затримки [2, 6, 10].

У більшості одночастотних GNSS-приймачів для зменшення іоносферної затримки використовується модель Клобучара (Klobuchar model), яка враховує добову зміну TEC та положення Сонця. У навігаційному повідомленні супутники GNSS передають вісім параметрів моделі, які є функціями рівня сонячного випромінювання та сезонності, що дозволяє компенсувати близько 50 % похибки вимірювання псевдовіддалі через некомпенсовану іоносферну затримку. У середніх широтах остаточна затримка може перевищувати 10м, залежно від сонячної активності [9].

Є кілька моделей, що покращують модель Klobuchar. Зокрема, це алгоритм іоносферної корекції NTCM та його модифікація MNTCM-BC, якими можна скористатись замість моделі Klobuchar. Пропоновані алгоритми забезпечують зменшення RMSE на 0,24 м для спокійного стану іоносфери та на 0,45 м для її збуреного стану [8, 12].

Інший підхід до оцінювання та коригування іоносферних затримок полягає у застосуванні математичного апарату часових рядів, зокрема для прогнозу короткочасних змін TEC у задачах координатних визначень, а також метод експоненційного згладження Хольта-Вінера [10]. Моделі часових рядів у геодезії застосовують для аналізу, прогнозування та виявлення закономірностей у змінах у часі геодезичних вимірювань. Вони особливо важливі в задачах моніторингу деформацій споруд, земної кори, гідрологічних процесів та супутникових вимірювань.

У геодезії стан іоносфери має велике значення, оскільки він впливає на точність супутникових вимірювань. Іоносферні збурення викликають додаткові похибки у визначенні координат, висот та часових параметрів. Тому часові ряди застосовують для моделювання і прогнозування стану іоносфери, зокрема її електронної концентрації, для якої виділяють тренди та циклічності, зокрема, добові та сезонні зміни, 11-річний сонячний цикл. За допомогою спектрального аналізу, використання гармонічних моделей та Фур'є-аналізу моделюють геомагнітні збурення та бурі іоносфери. За стохастичними моделями ARIMA, SARIMA отримують прогноз короткочасних змін TEC, а за моделлю AR (модель авторегресії) – аналіз залежностей між теперішнім і минулим станом іоносфери.

Калманівський фільтр у GNSS-навігації застосовують для оперативного оцінювання іонізованої складової затримки сигналу та її прогнозування. Короткостроковий прогноз, від кількох хвилин до кількох годин використовують для реального часу в навігації, середньостроковий прогноз на період від доби до кількох діб – для планування геодезичних спостережень, а довгостроковий прогноз на тижні та місяці – для дослідження циклів сонячної активності та глобальних змін.

За часовим рядом значень TEC для певної GNSS-станції, можна виділити тренд, наприклад, сезонне зростання під час сонячного максимуму, виявити добову гармоніку, застосувати алгоритм ARIMA або LSTM для прогнозу значень TEC на кілька годин уперед. Цей прогноз дозволяє зменшити похибки під час обчислення координат і підвищити точність навігаційних рішень.

Перевагою методу числових рядів, перед усім, є підвищення точності GNSS-вимірювань, зокрема, зменшення іоносферної похибки у визначенні координат, висот і часу, що особливо важливо для високоточних вимірів. Можливість короткострокового прогнозу, що важлива для оперативної навігації, авіації, мореплавства, реалізують моделі ARIMA та Kalman, які дозволяють передбачати зміни TEC на години уперед [4]. Ефективність застосування математичного апарату часових рядів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Ефективність застосування математичного апарату часових рядів порівняно з емпіричними моделями

Table 1 – Efficiency of the application of the mathematical apparatus of time series compared to empirical models

Критерій	Емпіричні (IRI, NeQuick)	Моделі часових рядів
Точність	Обмежена, часто неможливе врахування локальних та короткочасних збурень	Вища точність завдяки аналізу реальних вимірювань TEC у F2
Прогнозування	Ґрунтується на усереднених даних	Дає короткостроковий та середньостроковий прогнози
Реальний час	Слабка адаптивність до реального часу	Легко адаптується через фільтри та онлайн-моделі
Урахування циклічностей	Добові та сезонні цикли визначені наперед, отже не точно	Виділяє реальні циклічності безпосередньо з даних
Виявлення збурень	Не завжди коректно відображає геомагнітні збурення	Чутливі до різних змін, можуть фіксувати аномалії
Гнучкість	Модель важко адаптувати до локальних умов	Легко адаптується під конкретну станцію або регіон
Застосування в геодезії	Підходять для довгострокових усереднених оцінок	Найкращі для точних GNSS-вимірювань у реальному часі

Отже, традиційні моделі придатні для глобальних довгострокових оцінок, а часові ряди – для оперативних прогнозів і забезпечення високоточних геодезичних вимірювань.

Треба відзначити широке використання емпіричних моделей іоносфери, таких як Міжнародна еталонна модель іоносфери сімейства моделей IRI [14, 15] із останньою модифікацією IRI 2020 та NeQuick [13], що задовольняють вимогам оперативності моделювання просторового розподілу ПЕВ (TEC) за рахунок ефективніших емпіричних підходів та обчислень. NeQuick – це напівемпірична модель, яка описує просторові та часові варіації щільності електронів в іоносфері. Вона надає дані про вертикальний та похилий вміст електронів для будь-якого заданого шляху і демонструє кращі результати з максимальними похибками щодо моделі Klobuchar. Порівняння двох моделей показало, що модель NeQuick має кращі характеристики, ніж модель Klobuchar. Остання модифікація моделі NeQuick – модель NeQuick 2, оцінка її ефективності відповідає сучасним підходам, що отримані за даними експериментів для моделі IRI 2020.

Для покращення компенсації іоносферної затримки супутниковою системою доповнення SBAS (Satellite-Based Augmentation System) у реальному часі надсилаються корекції іоносферної затримки.

SBAS використовує наземні станції для моніторингу GNSS-сигналів та передає корекції в реальному часі через супутники. Наземні контрольні станції постійно приймають сигнали від супутників та обчислюють помилки позиціонування, включаючи іоносферну затримку, помилки ефемерид, зсув годинника супутника, а центр обробки даних формує корекційні повідомлення. Через SBAS-супутник ці корекції транслюються назад до користувачів. GNSS -приймач отримує SBAS-корекції та вносить поправки до своїх вимірювань, забезпечуючи точність 1-3 метри.

Іоносферну групову затримку і фазове випередження можна оцінити за двочастотними вимірами та істотно виключити вплив іоносфери на їхню точність. Для цього утворюють різниці між параметрами вимірів, у яких нові параметри розглядають як нові виміри. Проте, по-перше, доводиться враховувати їхню кореляцію з попередніми параметрами, а по-друге, нові виміри стають більш зашумленими, особливо це стосується іоносферної затримки через її залежність, окрім рівня сонячної активності під час спостереження, від висоти супутника над горизонтом, широти приймача та часу доби. Частково, на 25-50 %, іоносферну затримку усувають шляхом використання іоносферної моделі, що надається у навігаційному повідомленні, але у фазових вимірах залишається істотне остаточне зміщення, оскільки вплив іоносфери становить десятки метрів. Найбільше ефективним способом компенсації іоносферної затримки є спостереження на двох частотах L-діапазону з подальшим використанням лінійних комбінацій фази, вільних від впливу іоносфери (iono-free). Використання фазових GNSS-спостережень забезпечує сантиметрову точність координатних визначень, але лише за умови надійного розв'язання фазових неоднозначностей на двох несучих частотах, що істотно утруднює розв'язання задачі.

Міжнародна служба IGS (International GNSS Service) поширює глобальні карти GIM (Global Ionospheric Map) вертикального іоносферного ПЕВ (VTEC, vertical total electron content), які створені на підставі супутникових даних [17]. Дані карт GIM зазвичай розповсюджуються у форматі IONEX (IONosphere map EXchange format) у вигляді таблиць або матриць, що містять значення VTEC на сітці широти/довготи з часовими інтервалами. Формат IONEX є стандартом обміну картами іоносферного вмісту. Для створення карт GIM глобальні наземні станції GNSS здійснюють збір даних, що після певного опрацювання й усереднення збирають у сітку, наприклад з кроком $2,5^\circ$ широти та 5° довготи і за часом 2 години. Карти містять значення VTEC в TECU одиницях. Опрацьовані файли у форматі IONEX публікують для користувачів GNSS та дослідників іоносфери тощо. Пропонуються до використання такі форми GIM: кінцева версія із затримкою близько 11 днів (Final GIM), обновлювана щодня із затримкою до 1 доби (Rapid GIM), карти, що генеруються в реальному часі (Real-Time GIM або RT-GIM) та прогнози GIM, передбачувані на 1-2 доби уперед.

Помилки карт GIM, тобто відхилення від справжнього VTEC, зазвичай виражають в одиницях TECU. Точність залежить від щільності станцій, космічної погоди, варіацій іоносфери, методів інтерполяції та моделювання. При високій сонячній активності або магнітних бурях похибки зростають. У дослідженнях RMS, RT-GIM їхні значення могли досягати 7-12 TECU під час високої активності. Також важливим елементом є оцінка невизначеностей карти, яку часто включають у IONEX як RMS сітки. Карти GIM/IONEX застосовують для корекції іоносферного зсуву з метою підвищення точності позиціонування та інтегрують у геодезичні системи для підвищення точності обчислень, зокрема у супутниковій геодезії.

За наявності щільної мережі локальних GNSS-станцій створюють регіональні моделі TEC, які дозволяють враховувати певні особливості іоносфери в даному регіоні. Головною перевагою регіональних моделей TEC є вища точність порівняно із глобальними картами GIM, оскільки глобальні моделі мають розріджену просторову роздільність, що становить $2,5^\circ \times 5^\circ$, тоді як регіональні моделі істотно детальніші, наприклад, просторова роздільність може становити $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ або краще. Це дозволяє точніше описувати дрібномасштабні варіації TEC та врахувати регіональну специфіку іоносфери [2, 3, 7, 16]. Регіональні моделі можуть краще враховувати локальні особливості, наприклад, ефекти середніх широт. Зокрема, для України актуальним є моделювання середньопрошторної іоносфери з урахуванням сезонних змін. Головна перевага регіональних моделей TEC – підвищена точність і надійність у конкретному регіоні завдяки густій мережі спостережень і більшій просторово-часовій

роздільності. Крім того, регіональні моделі мають кращу оперативність і адаптивність за рахунок того, що регіональні центри часто оновлюють моделі в реальному часі. На відміну від глобальних моделей, що містять усереднені дані, регіональні дозволяють оперативно виявити локальні аномалії та краще їх компенсувати. Дослідження показують, що регіональні моделі TEC можуть зменшувати залишкову похибку на 30-50 % порівняно з глобальними картами, а у деяких випадках точність корекції досягає 90-95 % іоносферної затримки.

Висновки. В умовах стрімкого розвитку GNSS-технологій та зростання вимог до точності супутникових вимірювань вплив іоносферної затримки залишається істотним обмежуючим фактором. Огляд підходів та методів компенсації іоносферної затримки у супутникових вимірах показує, що у випадку використання одночастотних GNSS-приймачів, яке часто використовують на практиці, точної компенсації іоносферних похибок можна досягти тільки з використанням додаткової інформації, а саме диференціальних корекцій та іоносферних моделей. Окрім моделі Klobuchar, яка компенсує іоносферну затримку на 50 %, для підвищення точності доцільно застосовувати дані супутникової системи доповнення SBAS та GIM IONEX (IGS), або за можливістю, регіональної моделі TEC.

Для розв'язання геодезичних задач, що вимагають високоточного вимірювання базових ліній довжиною понад 500 кілометрів, з метою компенсації іоносферної затримки застосовують метод двочастотних вимірів у діапазонах L1 і L2. Використання двочастотних GNSS-приймачів забезпечує можливість формування лінійних комбінацій двочастотних вимірів, що не містять іоносферних похибок і використовуються для майже повного виключення впливу іоносфери за подвійними різницями фаз. Проте це вимагає надійного вирішення фазових неоднозначностей, що ускладнює процес.

Головною перевагою регіональних моделей TEC є підвищення точності завдяки щільній мережі спостережень, краща оперативність за рахунок своєчасного оновлення моделі у реальному часі та можливість оперативно виявляти локальні аномалії. Побудова точної регіональної моделі має ґрунтуватись на глибокому усвідомленні фізичних процесів, що відбуваються у іоносфері у певному регіоні, та точному оцінюванні відповідних параметрів.

Під час розв'язання задач координатно-часового забезпечення для мінімізації помилок GNSS-вимірювань і підвищення їх загальної точності вирішальним є вибір найбільше ефективної моделі та методів її адаптації для задоволення вимог до точності.

Підсумовуючи, слід зазначити, що вибір оптимального методу компенсації іоносферної затримки залежить від конкретних вимог до точності, регіону застосування та типу GNSS-приймача. З метою забезпечення максимальної точності позиціонування у координатно-часовому просторі доцільно поєднувати двочастотні вимірювання, регіональні моделі та сучасні методи прогнозування, які адаптовані до локальних умов іоносфери.

Перелік посилань

1. Ярош О., Янків-Вітковська Л. Сучасні підходи до аналізу іоносферної поправки в GNSS-вимірах. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2024. випуск II (48) . С. 29–33. URL: <https://ena.lpnu.ua/items/8f8a178c-e6e1-4a4f-8870-b794d54c38dc>
2. Янків-Вітковська Л. М., Джуман Б. Б. Побудова просторово-часової моделі параметру іоносфери VTEC. Вісник Національного технічного університету «КПІ». Серія: Радіотехніка та радіоапаробудування. 2020. № 80. С. 21–28.
3. Янків-Вітковська Л.М. Методика визначення параметрів іоносфери у мережі супутникових станцій західної України. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 6. С. 47–52.
4. Ярош О., Янків-Вітковська Л. Сучасні підходи до зменшення іоносферної поправки в GNSS-вимірах. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2024», 10–12 квітня 2024 р., Львів-Брюховичі. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2024. С. 141–142.
5. Yankiv-Vitkovska L.M., Savchuk S.H., Pauchok V.K., Matviichuk Y.M., Bodnar D.I. Recovery of the Spatial State of the Ionosphere Using Regular Definitions of the TEC Identifier at the Network

of Continuously Operating GNSS Stations of Ukraine. *Journal of Geodesy and Geomatics Engineering*. 2016. Vol. 1(9). P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.17265/2332-8223/2016.01.005>

6. Безсонов Є.А. Удосконалення мережевих методів і алгоритмів оцінки та урахування іоносферних і тропосферних затримок сигналів глобальних навігаційних супутникових систем в задачах точного позиціонування : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17. Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2015. 23 с.

7. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Янчук Р.М. Про визначення параметрів іоносфери на GNSS-станції RVNE в режимі реального часу. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки»*. 2013. Випуск 3(63). С. 308–315.

8. Mohammed Mainul Hoque, Norbert Jakowski and Jens Berdermann. Positioning performance of the NTCM model driven by GPS Klobuchar model parameters. *J. Space Weather Space Clim*. 2018. Volume 8, Article Number 20. P. 10. DOI: <https://doi.org/10.1051/swsc/2018009>

9. Лізунов Г.В., Корепанов В.Є., Лукенюк А.А., П'янкова О.В., Федоров О.П. Космічний проєкт «Іоно-сат-Мікро»: готовність до реалізації. *Космічна наука і технологія*. 2022. № 6 (139). С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.003>

10. Янків-Вітковська Л. Використання двочастотних GNSS спостережень для визначення параметрів іоносфери. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2012. № 76. С. 19–28. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap>.

11. Bingbing Zhang, Jiqiang Niu, Wang Li, Yi Shen, Tangting Wu, Weifeng Yang, Wenping Deng. A single station ionospheric empirical model using GPS-TEC observations based on nonlinear least square estimation method. *Advances in Space Research*. 2021. Volume 68. Issue 9. P. 3821–3834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.07.017>

12. Mallika L., Ratnam D.V., Raman S., Sivavaraprasad G. Machine learning algorithm to forecast ionospheric time delays using global navigation satellite system observations. *Acta Astronautica*. 2020. № 173. P. 221–231.

13. Sandro Radicella, Nava B. NeQuick model: Origin and evolution. *Annals Of Geophysics*. 2009. Vol. 52. № ¾. Pp. 417–422. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2010.5696491>

14. Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere. *Advances in Radio Science*. 2018. № 16. P. 1–11

15. Reznichenko M.O., Bogomaz O.V., Reznichenko A.I., Kotov D.V. Comparison of the IRI-2020 model predictions with the observations in the european-african longitudinal sector during the period of 1-9 february 2022. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. 32-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2024*, Харків: НТУ "ХПІ", 2024. С. 1487. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/8b1fd9c2-a63c-4b5c-8661-180b9c97be52>

16. Yankiv-Vitkovska L., Dzhuman B. Constructing of regional model of ionosphere parameters. *Geodesy, Cartography and Aerial photography*. 2017. Volume 85. № 85. P. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2017.01.027>

17. Ren X., Chen J., Li X., Zhang X., Freeshah M. Performance evaluation of real-time global ionospheric maps provided by different IGS analysis centerse GPS Solutions. 2019. № 23(4). P. 1–17.

METHODS OF COMPENSATION OF IONOSPHERIC DELAY OF GNSS SIGNALS: COMPARISON AND PROSPECTS OF APPLICATION

Voronkov Oleksii, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the department of land administration and geoinformation systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail: Oleksii.voronkov@kname.edu.ua, tel. +380505782843, <http://orcid.org/0000-0001-6905-0098>

Kukhar Maksym, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail: ppoosshhtaa@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8305-6269>

Maslii Lubov, Head of laboratory, Senior lecturer, of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail gnomomir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3844-462X>

Summary. Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are critical for high-precision positioning, navigation, and time synchronization across various domains, including transportation, geodesy, aviation, and scientific research. However, the accuracy of GNSS signals is significantly affected by ionospheric delay, caused by the interaction of radio signals with charged particles in the ionosphere. This delay, influenced by signal frequency, ionospheric conditions, time of day, geographic location, and solar activity, introduces positioning errors that can reach several meters, posing challenges for applications requiring high precision, such as geodesy and autonomous navigation. Existing correction methods, including the widely used Klobuchar model, SBAS augmentation systems, and global ionospheric maps (GIM), have limitations, such as high equipment costs, reliance on external data, or insufficient accuracy in regions with high ionospheric variability. This article reviews current methods for mitigating ionospheric delay, analyzing their features, advantages, and drawbacks, and evaluates their effectiveness in real-time and post-processing coordinate determination tasks.

The study highlights that single-frequency GNSS receivers, commonly used in practice, rely on models like Klobuchar, which compensates for approximately 50% of ionospheric errors. More advanced models, such as NTCM and NeQuick, offer improved accuracy, reducing root mean square errors (RMSE) by 0.24–0.45 meters depending on ionospheric conditions. Dual-frequency GNSS receivers, utilizing ionosphere-free linear combinations of L1 and L2 band measurements, provide superior accuracy but require resolving phase ambiguities, which complicates implementation. Regional Total Electron Content (TEC) models outperform global GIMs due to higher spatial-temporal resolution (e.g., $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ vs. $2.5^\circ \times 5^\circ$), achieving up to 90–95% error reduction in specific cases. Time-series analysis methods, such as ARIMA, SARIMA, and Kalman filtering, enable short-term TEC forecasting, enhancing real-time navigation and geodetic measurements. The article emphasizes the importance of selecting correction methods based on application requirements, receiver type, and regional ionospheric characteristics, advocating for the integration of regional TEC models, dual-frequency measurements, and advanced forecasting techniques to achieve optimal GNSS accuracy.

Keywords: Earth's ionosphere, GNSS technologies, ionospheric delay, global ionospheric map, regional TES model, satellite geodesy, mathematical processing of geodetic data, complex systems.

References

1. Yarosh, O., Yankiv-Vitkovska, L. (2024) Modern approaches to the analysis of ionospheric correction in GNSS measurements. Modern achievements in geodetic science and production. Issue II (48). Pp. 29–33. <https://ena.lpnu.ua/items/8f8a178c-e6e1-4a4f-8870-b794d54c38dc> [in Ukrainian].
2. Yankiv-Vitkovska, L., Dzhumann, B. (2020). Construction of a spatial-temporal model of the ionosphere parameter VTEC. Bulletin of the National Technical University «KPI». Series: Radio Engineering and Radio Apparatus Engineering. № 80. Pp. 21–28. [in Ukrainian].
3. Yankiv-Vitkovska, L. (2013). Methodology for determining ionosphere parameters in the network of satellite stations in western Ukraine. Space Science and Technology. T. 19. №6. Pp. 47–52. [in Ukrainian].
4. Yarosh, O., Yankiv-Vitkovska, L. (2024) Modern approaches to reducing ionospheric correction in GNSS measurements. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference ‘Geforum-2024’, Lviv-Bryukhovychi. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, pp. 141–142. [in Ukrainian].
5. Yankiv-Vitkovska, L., Savchuk, S., Pauchok, V., Matviichuk, Y., Bodnar, D. (2016) Recovery of the Spatial State of the Ionosphere Using Regular Definitions of the TEC Identifier at the Network of Continuously Operating GNSS Stations of Ukraine. Journal of Geodesy and Geomatics Engineering. Vol. 1(9). P. 37–48. <https://doi.org/10.17265/2332-8223/2016.01.005> [in Ukrainian].

6. Bezsonov, E. (2015) Improvement of network methods and algorithms for assessing and accounting for ionospheric and tropospheric signal delays of global navigation satellite systems in precise positioning tasks: abstract of thesis ... Candidate of Technical Sciences: 05.12.17. Kharkiv National University of Radio Electronics. Kharkiv, 23 p. [in Ukrainian].
7. Yankiv-Vitkovska, L., Savchuk, S., Yanchuk, R. (2013) On determining ionosphere parameters at the RVNE GNSS station in real time. Bulletin of the National University of Water and Environmental Management. Series 'Technical Sciences'. Issue 3(63). P. 308–315. [in Ukrainian].
8. Mohammed Mainul Hoque, Norbert Jakowski and Jens Berdermann (2018) Positioning performance of the NTCM model driven by GPS Klobuchar model parameters. J. Space Weather Space Clim. Volume 8, Article Number 20. P. 10. <https://doi.org/10.1051/swsc/2018009>
9. Lizunov, G., Korepanov, V., Lukenyuk, A., Pyankova, O., Fedorov, O. (2022) Space project 'Iono-sat-Micro': readiness for implementation. Space Science and Technology. № 6 (139). Pp. 3–11. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.003> [in Ukrainian].
10. Yankiv-Vitkovska, L. (2012) Use of dual-frequency GNSS observations to determine ionosphere parameters. Geodesy, Cartography and Aerial Photography. №. 76. P. 19–28. <https://doi.org/10.23939/istcgcap> [in Ukrainian].
11. Bingbing Zhang, Jiqiang Niu, Wang Li, Yi Shen, Tangting Wu, Weifeng Yang, Wenping Deng (2021) A single station ionospheric empirical model using GPS-TEC observations based on nonlinear least square estimation method. Advances in Space Research. Volume 68. Issue 9. P. 3821–3834. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.07.017>
12. Mallika, L., Ratnam, D.V., Raman, S., Sivavaraprasad, G. (2020) Machine learning algorithm to forecast ionospheric time delays using global navigation satellite system observations. Acta Astronautica. № 173. P. 221–231.
13. Sandro Radicella, Nava, B. (2009) NeQuick model: Origin and evolution. Annals Of Geophysics. Vol. 52. № ¾. Pp. 417–422. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2010.5696491>
14. Bilitza, D. (2018) IRI the international standard for the ionosphere. Advances in Radio Science. № 16. P. 1–11.
15. Reznichenko, M., Bogomaz, O., Reznichenko, A., Kotov, D. (2024) Comparison of the IRI-2020 model predictions with the observations in the european-african longitudinal sector during the period of 1-9 february 2022. Information technologies: science, engineering, technology, education, health: abstracts of the 32nd International Scientific and Practical Conference MicroCAD–2024, Kharkiv: NTU 'KhPI'. P. 1487. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/8b1fd9c2-a63c-4b5c-8661-180b9c97be52>
16. Yankiv-Vitkovska, L., Dzhuman, B. (2017) Constructing of regional model of ionosphere parameters. Geodesy, Cartography and Aerial photography. Volume 85. № 85. P. 27–35. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2017.01.027>
17. Ren, X., Chen, J., Li, X., Zhang, X., Freeshah, M. (2019) Performance evaluation of real-time global ionospheric maps provided by different IGS analysis centerse GPS Solutions. № 23(4). P. 1–17.

Дата надходження до редакції 22.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 06.01.2026.

ВПЛИВ РЕКОНСТРУКЦІЇ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЖИТЛОВИХ
БУДИНКІВ НА АКТУАЛЬНІСТЬ ВІДОМОСТЕЙ МІСТОБУДІВНОГО КАДАСТРУRECONSTRUCTION OF INDIVIDUAL RESIDENTIAL HOUSES: IMPLICATIONS FOR
URBAN CADASTRE DATA ACCURACY

Нестеренко Галина Богданівна, кандидат економічних наук, доцент кафедри земельного кадастру, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, м. Дубляни, Україна, тел. +38067-6978647, e-mail: galsanesterenko@gmail.com.

[https:// ORCID.ORG/0000-0002-4411-1242](https://ORCID.ORG/0000-0002-4411-1242)

Анотація. Мета: обґрунтувати необхідність включення інформації про реконструкцію індивідуальних житлових будинків до містобудівного кадастру України з огляду на їхній вплив на щільність забудови, інфраструктурні потреби та правовий статус об'єктів нерухомості.

Методи: аналіз чинного законодавства України (Цивільний кодекс, Закон «Про регулювання містобудівної діяльності», Закон «Про особливості здійснення права власності у багатоквартирному будинку»), державних будівельних норм, а також містобудівний аналіз прикладів трансформації квартир у малоповерхових будинках у статус індивідуальних житлових будинків. Використано методи правового аналізу, систематизації нормативних положень та узагальнення практики реконструкції.

Результати: встановлено, що реконструкція житлових будинків змінює площу, об'єм, кількість поверхів та функціональне призначення об'єктів, що безпосередньо впливає на актуальність даних містобудівного кадастру. Виявлено правові та технічні підстави для трансформації статусу квартири у садибний будинок, а також окреслено проблеми приватизації земельних ділянок у таких випадках.

Наукова новизна: запропоновано комплексний підхід до розгляду реконструкції індивідуальних житлових будинків як чинника, що змінює не лише технічні характеристики будівель, але й їхній правовий статус, що потребує системного відображення у містобудівному кадастрі.

Практична значущість: результати можуть бути використані для вдосконалення процедур ведення містобудівного кадастру, забезпечення актуальності даних для планування розвитку територій, а також для врегулювання правових питань співвласників житлових будинків при приватизації земельних ділянок.

Перспективи подальших досліджень: розробка методичних рекомендацій щодо внесення змін про реконструкцію до містобудівного кадастру та аналіз соціально-економічних наслідків трансформації житлової забудови в умовах сучасних викликів, зокрема війни.

Ключові слова: містобудівний кадастр, реконструкція житлових будинків, індивідуальний житловий будинок, земельна ділянка, правовий статус нерухомості.

Вступ. Містобудівний кадастр в Україні являє собою інтегровану геоінформаційну систему, призначену для забезпечення сукупності та логічного поєднання електронних інформаційних ресурсів у сфері містобудування. Ця система відіграє ключову роль у підтримці обґрунтованих управлінських рішень, прогнозуванні та плануванні розвитку територій. Зважаючи на важливість всебічного обліку змін у забудові населених пунктів, виникає необхідність обґрунтування включення до містобудівного

кадастру інформації про реконструкцію індивідуальних житлових будинків. Метою є забезпечення повноти даних містобудівного кадастру та дотримання вимог законодавства.

Огляд існуючих теоретичних розробок. Реконструкція індивідуальних житлових будинків має відчутний вплив на такі міські показники, як щільність населення та потреби в інфраструктурі. Тому її включення до містобудівного кадастру є необхідною умовою для прийняття обґрунтованих рішень у сфері містобудування. Без точних даних про зміни, пов'язані з реконструкцією, планування ризикує базуватися на неактуальній інформації, що може призвести до неадекватного забезпечення інфраструктури та неефективного використання земельних ресурсів.

Доволі часто, зустрічаються випадки в кварталах садибної забудови, коли малоповерховий житловий будинок розподілений на квартири, а земля під ним є не приватизована та перебуває у комунальній власності. Власники такої нерухомості часто виявляють бажання приватизувати земельні ділянки які використовують, проте, в процесі оформлення виникають труднощі, адже відведення земельних ділянок у приватну власність у зазначеному випадку можливе лише при зміні правового статусу «квартири» на «житловий будинок». Як змінити статус квартири на садибний будинок? Питання функціонування квартири, як об'єкта нерухомого майна врегульовані чинним законодавством (Цивільний кодекс України, Державні будівельні норми, Закон України «Про об'єднання співвласників багатоквартирного будинку»).

Згідно Цивільного кодексу України (ЦКУ) подільною є річ, яку можна поділити без втрати її цільового призначення, а кожен співвласник має право на виділ у натурі частки із майна, що є у спільній частковій власності [13].

Відповідно Закону України «Про особливості здійснення права власності у багатоквартирному будинку» визначено: багатоквартирний будинок – це житловий будинок, а якому розташовано три чи більше квартири [9].

Власники квартир та нежитлових приміщень є співвласниками спільного майна багатоквартирного будинку, спільне майно багатоквартирного будинку є спільною сумісною власністю співвласників.

Основною ознакою садибної забудови, складовою якої є зблоковані житлові будинки, полягає у поширенні прав власності на земельну ділянку та розташовані на ній нерухомі об'єкти домоволодіння. Згідно з Законом України «Про засади державної регуляторної політики у сфері господарської діяльності» [5], який визначає порядок проведення робіт з поділу, виділу та розрахунку часток житлових будинках, будівель, споруд, іншого нерухомого майна, крім земельних ділянок, та застосовується суб'єктами господарювання, які здійснюють технічну інвентаризацію об'єктів нерухомого майна при підготовці проектних документів щодо можливості проведення робіт з поділу, виділу та розрахунку часток об'єктів нерухомого майна, поділ та виділ частки в натурі здійснюється відповідно до законодавства з наданням Висновку щодо технічної можливості поділу об'єкта нерухомого майна або Висновку щодо технічної можливості виділу в натурі частки з об'єкта нерухомого майна.

Вимоги на проектування нових і реконструкцію, капітальний ремонт та технічне переоснащення житлових будинків встановлені ДБН В.2.2-15:2019 «Житлові будинки. Основні положення».

Підставами для переведення окремих квартир малоповерхового житлового будинку із окремими земельними ділянками та виходами на них у індивідуальний житловий будинок можуть бути [2]:

- ✓ реконструкція малоповерхового житлового будинку із створенням (поділом) на індивідуальні житлові (садибні) будинки;
- ✓ реконструкція квартири малоповерхового житлового будинку із створенням індивідуального житлового (садибного) будинку;
- ✓ судові рішення.

Оптимальним варіантом є процедура реконструкції малоповерхового житлового будинку із створенням (поділом) на індивідуальні житлові (садибні) будинки у випадку, тоді всі квартири змінюють

свій статус, або реконструкція квартири малоповерхового житлового будинку із створенням індивідуального житлового (садибного) будинку для окремої квартири у будинку.

Ущільнення садибної забудови проявляється у двох основних формах: по-перше, шляхом зведення нових односімейних будинків у глибині ділянок, по-друге, через будівництво багатоповерхівок на невеликих ділянках біля доріг, часто без належного прибудинкового простору та паркомісць. Найбільш поширеним є ущільнення за рахунок добудов або нового будівництва на існуючих ділянках, що призводить до формування не однорідного простору як з точки зору забудови, так і соціального складу мешканців [1].

У ситуації, коли малоповерховий житловий будинок поділений на квартири, – як змінити статус квартири на садибний будинок, аби її добудувати та збільшити житлову площу чи зробити індивідуальний вихід на земельну ділянку? Необхідно провести реконструкцію квартири. Питання функціонування квартири, як об'єкта нерухомого майна врегульовані чинним законодавством (Цивільний кодекс України, Державні будівельні норми, Закон України «Про об'єднання співвласників багатоквартирного будинку» тощо).

Реконструкція житлового будинку призводить до змін у існуючих даних містобудівного кадастру та вимагає внесення оновлень або нової інформації. До таких змін належать зміни у площі забудови, загальній площі будівлі, її об'ємі та кількості поверхів. Кадастр повинен відображати оновлені технічні характеристики будівлі, такі як використані матеріали, заходи з енергоефективності та структурні зміни, які можна отримати з проектною документацією.

Для розуміння необхідності включення реконструкції індивідуальних житлових будинків до містобудівного кадастру, важливо чітко визначити, що саме розуміється під цим терміном згідно з українським законодавством. Реконструкція приватного будинку визначається як будівельні роботи, пов'язані з втручанням у несучі, зовнішні конструкції чи інженерні комунікації. До реконструкції також відносять зміну функції об'єкта нерухомості, наприклад, переведення нежитлового приміщення в житлове, а також будь-які роботи зі зміною геометрії будівлі. Оформлення дозволу на реконструкцію є необхідним у випадках, коли передбачається втручання в огорожувальні та несучі елементи об'єкта, а також при зміні його геометричних розмірів. Фактично, реконструкція є повною перебудовою будівлі з метою її поліпшення, що може включати зміну планування, додавання або знесення поверхів, а також зміну функціонального призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У підручнику «Реконструкція міських територій» [12] колектив авторів ґрунтовно ознайомив зі змістом і завданнями реконструкції територій різних функціональних зон і районів міст; надав розвиток навичкам містобудівного аналізу, обґрунтував методику обстеження та сучасного стану міських та інженерної й транспортної інфраструктури міст; розвинув навички приймати науково обґрунтовані рішення щодо розробки містобудівної документації.

Колектив авторів обґрунтував, що об'єктом реконструкції забудови є сукупність будівель та споруд, розташованих на локалізованій території, яка розглядається як планувальна цілісність з встановленими межами та визначеним функціональним призначенням (житлова садибна, житлова багатоквартирна, громадська, промислова забудова тощо), а також інженерно-транспортна інфраструктура, що забезпечує функціонування об'єкта реконструкції [12].

Метою реконструкції є створення, на базі існуючої забудови, сучасного комфортного середовища проживання, з усім комплексом інженерно-транспортного, побутового обслуговування та благоустрою [15].

У монографії «Проблеми та перспективи розвитку житлової забудови в умовах комплексної реконструкції міста» [4] авторський колектив описав ключові засади реконструкції житлової забудови як одного із важливих напрямів вирішення житлової проблеми. Вона дає змогу не тільки продовжити життєвий цикл, а й істотно поліпшити якість житла, ліквідувати комунальне заселення, забезпечити будинки сучасним інженерним обладнанням, поліпшити архітектурну виразність будівель, підвищити їхню енергоефективність, експлуатаційну надійність і довговічність.

Проте юридичні аспекти проведення реконструкції існуючої забудови висвітлені мало.

Широке визначення реконструкції, що охоплює різні рівні втручання в будівлю, підкреслює необхідність детальної фіксації цих змін у містобудівному кадастрі. Просте зазначення факту «реконструкції» може бути недостатнім; кадастр повинен мати можливість відображати тип та обсяг проведених робіт для забезпечення більш точного розуміння змін у міському середовищі.

Включення інформації про реконструкцію індивідуальних житлових будинків до містобудівного кадастру є вкрай важливим з кількох ключових причин. Реконструкція суттєво змінює характеристики будівлі, включаючи її площу, об'єм, конфігурацію та потенційно функціональне призначення. Ці зміни безпосередньо впливають на щільність забудови, навантаження на інфраструктуру та планування землекористування. Коли існуюча будівля модернізується або розширюється, це може призвести до збільшення кількості мешканців або змінити потреби в комунальних послугах, що необхідно враховувати при плануванні розвитку міської інфраструктури.

Точні дані про реконструйовані будівлі є важливими для ефективного міського планування та управління, включаючи планування інфраструктури (водопостачання, електроенергія, каналізація), транспортне планування та забезпечення соціальних послуг. Без обліку реконструкцій, планування може базуватися на застарілій інформації, що призведе до неефективного розподілу ресурсів та невідповідності інфраструктури реальним потребам населення. Включення реконструкції до містобудівного кадастру забезпечує відображення актуального стану житлового фонду, що є важливим для цілей оподаткування нерухомості, планування дій у надзвичайних ситуаціях та статистичного аналізу тенденцій у житловому будівництві.

Постановка завдання. Об'єктом дослідження обрано квартиру в малоповерховому житловому будинку, як об'єкт цивільних прав та бажання власника такої квартири «перевести» її в індивідуальний житловий будинок. Розглянемо правовий аспект такої трансформації та відображення цих змін у містобудівному кадастрі.

Мета роботи полягала у виявленні можливостей трансформації статусу квартири в малоповерховому житловому будинку в статус індивідуального житлового будинку. Ми намагались обґрунтувати необхідність включення інформації про реконструкцію індивідуальних житлових будинків до містобудівного кадастру України з огляду на їхній вплив на щільність забудови, інфраструктурні потреби та правовий статус об'єктів нерухомості. Дослідимо спочатку, як визначається житловий будинок в технічних нормах, правилах та стандартах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Динамічний процес, що викликає цілий ряд змін у характеристиках будівлі та її правовому статусі називається реконструкцією. Містобудівний кадастр повинен мати можливість фіксувати ці зміни на різних рівнях даних, включаючи просторові дані (план, висота), атрибутивні дані (технічні характеристики, використання) та адміністративні дані (дозволи, дати завершення). Регулярне оновлення інформації є критично важливим для забезпечення точності та актуальності кадастру для цілей міського планування.

Реконструкція індивідуальних житлових будинків має відчутний вплив на такі міські показники, як щільність населення та потреби в інфраструктурі. Тому її включення до містобудівного кадастру є необхідною умовою для прийняття обґрунтованих рішень у сфері міського розвитку. Без точних даних про зміни, пов'язані з реконструкцією, планування ризикує базуватися на неактуальній інформації, що може призвести до неадекватного забезпечення інфраструктури та неефективного використання земельних ресурсів.

Війна та пандемія COVID-19 змінила погляд містян на житло, зробивши приватні будинки з ділянками більш привабливими. Комфорт і безпека, з якими вони асоціюються, спричиняють зростання цін на таку нерухомість. У містобудівному кадастрі повинні бути відображені правові аспекти реконструкції – видані дозволи, подані повідомлення та дата завершення робіт. Своєчасне оновлення містобудівної та кадастрової документації відповідно до чинних нормативних вимог і стандартів зберігання даних забезпечує актуальність відомостей та створює основу для ефективного управління територіями.

Згідно п. 3.3 ДБН В.2.2-15:2019 Житлові будинки. Основні положення [2]:

✓ багатоквартирний житловий будинок – це житловий будинок, до складу якого входить більше ніж одна квартира. Може бути заблокованого, секційного, коридорного, галерейного і терасного типів;

✓ заблокований житловий будинок – це будинок квартирної типу, що складається з двох і більше квартир, кожна з яких має безпосередній вихід на приквартирну ділянку або вулицю.

✓ одноквартирний житловий будинок – це індивідуальний житловий будинок, що має прибудинкову ділянку.

Відповідно до Цивільного кодексу України (ЦКУ) [13]: подільною є річ, яка ділиться без втрати свого цільового призначення (стаття 183), а виділ у натурі частки із майна, що є у спільній частковій власності, є правом співвласника (стаття 364).

У разі виділу співвласником у натурі частки із спільного майна для співвласника, який здійснив такий виділ, право спільної часткової власності на це майно припиняється. Така особа набуває право власності на виділене майно, і у випадку, встановленому законом, таке право підлягає державній реєстрації [13].

Згідно із статтею 368 ЦКУ спільною сумісною власністю є спільна власність двох і більше осіб без визначення часток кожного з них у праві власності.

Виділ частки із майна, що є у спільній сумісній власності, стаття 364 [13]:

➤ співвласник має право на виділ у натурі частки із майна, що є у спільній частковій власності;

➤ якщо виділ у натурі частки із спільного майна не допускається згідно із законом або є неможливим, відповідно до Закону;

➤ у разі виділу співвласником у натурі частки із спільного майна для співвласника, який здійснив такий виділ, право спільної часткової власності на це майно припиняється. Така особа набуває право власності на виділене майно, і у випадку, встановленому законом, таке право підлягає державній реєстрації.

Згідно Закону України «Про особливості здійснення права власності у багатоквартирному будинку» (далі – Закон №417-VIII) [9] – житловий будинок, а якому розташовано три чи більше квартири називається багатоквартирним. Якщо у ньому розташовані нежитлові приміщення, то вони є самостійними об'єктами нерухомого майна.

До складу спільного майна багатоквартирного будинку входять:

✓ функціональні простори (основні та допоміжні приміщення загального користування);

✓ конструктивні елементи, що забезпечують цілісність та безпеку будівлі (несучі, огорожувальні та несуче-огорожувальні конструкції);

✓ інженерні мережі, що забезпечують життєдіяльність будинку (механічне, електричне, сантехнічне обладнання);

✓ об'єкти інфраструктури на прибудинковій території, призначені для колективного користування співвласників;

✓ права на земельну ділянку.

Тобто, чинним законодавством регламентується, що власники квартир та нежитлових приміщень є співвласниками спільного майна багатоквартирного будинку, проте воно не може бути поділене між ними, а тим паче виділено в натурі, бо є їх спільною сумісною власністю співвласників.

Відповідно до пункту 3.19 ДБН В.2.2-12:2019 «Планування та забудова територій» [3] та пункту 3.14 ДБН В.2.2-15:2019 «Житлові будинки. Основні положення» [2] заблокований житловий будинок – це будинок квартирної типу, що складається з двох і більше квартир, кожна з яких має безпосередній вихід на приквартирну ділянку або вулицю.

Згідно п.3.25 ДБН В.2.2-15:2019 “Житлові будинки. Основні положення” одноквартирний житловий будинок визначається як індивідуальний житловий будинок, що має прибудинкову ділянку.

Відповідно до національного класифікатора НК 018:2023 [7] до класу 1110 «одноквартирні будинки» відносяться, зокрема, заблоковані будинки з окремими квартирами.

На підставі п. 3.57 ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій» [3], садибна забудова – це забудова, що сформована індивідуальними чи зблокованими житловими будинками.

Зблоковані будинки з окремими квартирами згідно з Національним класифікатором НК 018:2023 відносяться до будинків одноквартирних (клас 1110) [7]. Цей клас включає відокремлені житлові будинки садибного типу, дачі, будинки лісників, садові та інші літні будинки для тимчасового проживання та зблоковані та терасні будинки з окремими квартирами, кожна з яких має власний дах та власний вхід з вулиці.

Власний вхід з вулиці має індивідуальний житловий будинок, розміщення якого допускається на земельних ділянках з цільовим призначенням «Землі житлової та громадської забудови» та видом цільового призначення «для будівництва і обслуговування житлового будинку, господарських будівель і споруд (присадибна ділянка)» (код 007.00: група включає землі під житловими будинками з прибудинковими територіями, господарськими будівлями і спорудами; земельні ділянки для будівництва та обслуговування житлового будинку, під гуртожитками), згідно з Класифікацією видів земельних угідь (КВЗУ), затвердженої наказом Державного комітету України із земельних ресурсів від 17.10.2012 № 1051 [8].

Зблоковані будинки відносяться до багатоквартирних житлових будинків відповідно до пункту 3.3. ДБН В.2.2-15:2019 «Житлові будинки. Основні положення».

Таким чином є різні визначення «зблокованого будинку»:

- багатоквартирні будинки – згідно ДБН В.2.2-15:2019,
- одноквартирні та двоквартирні будинки – згідно НК 018:2023.

Згідно із ч.1 ст.1 Закону України «Про особливості здійснення права власності у багатоквартирному будинку» [9], багатоквартирний будинок – житловий будинок, в якому розташовано три чи більше квартири.

Проте з ДСТУ-Н Б Б.1.1-12:2011 «Настанови про склад та зміст плану зонування території (Зонінг)» зблоковані будинки можуть бути:

- одноквартирні житлові будинки до 3 поверхів із земельними ділянками та зблокованих одно-двоквартирних житлових будинків на сусідніх земельних ділянках – зона Ж-1 «Садибна забудова»,
- зблоковані житлові будинки з виходом з кожної квартири на земельну ділянку з поверховістю до 3 поверхів – зона Ж-2 «Блокована малоповерхова забудова».

Тобто, кожен блокований будинок є окремим об'єктом нерухомості і йому присвоюється окремий номер по вулиці (провулку тощо) і чинне законодавство дозволяє будівництво зблокованих індивідуальних житлових будинків на підставі будівельного паспорту (за умови неухильного дотримання інших норм містобудівного законодавства).

Відповідно до підрозділу 2 розділу I Інструкції про порядок проведення технічної інвентаризації об'єктів нерухомого майна, яку затверджено наказом Державного комітету будівництва, архітектури та житлової політики України від 24.05.2001 № 127 [6] (далі – Інструкція):

✓ блоковані будинки два та більше житлових (садибного типу, садові, дачні) будинків заввишки не більше чотирьох поверхів, у яких є хоча б одна спільна стіна, збудованих на межі окремих земельних ділянок за різними кадастровими номерами. Кожен блокований будинок є окремим об'єктом нерухомості і йому присвоюється окремий номер по вулиці (провулку тощо);

✓ будинок квартирної типу – одно- або багатоквартирний житловий будинок, у якому квартири є окремими об'єктами нерухомого майна. Будинки квартирної типу можуть бути одноповерховими та багатоповерховими;

✓ будинок садибного типу – житловий будинок, розташований на окремій земельній ділянці, який складається із житлових та допоміжних (нежитлових) приміщень. Будинки садибного типу належать, як правило, до малоповерхової забудови.

Наведені визначення характеризують різновид садибної забудови, яка згідно із пунктом 6.1.31 ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування та забудова територій» [3] має формуватися за принципами мікрорайонування окремими чи зблокованими житловими будинками з присадибними ділянками.

Згідно Цивільного кодексу України, статті 381, дається таке визначення садиби – це земельна ділянка разом з розташованими на ній житловим будинком, господарсько-побутовими будівлями, наземними і підземними комунікаціями, багаторічними насадженнями. У разі відчуження житлового будинку вважається, що відчужується вся садиба, якщо інше не встановлено договором або законом.

Тобто блокований будинок є самостійним об'єктом нерухомості з чітко встановленими межами земельної ділянки.

Вимоги на проектування нових і реконструкцію, капітальний ремонт та технічне переоснащення житлових будинків встановлені ДБН В.2.2-15:2019 «Житлові будинки. Основні положення» [2].

Розрахунок часток у спільній власності на об'єкти нерухомого майна виконується за заявами всіх співвласників об'єктів нерухомого майна.

У разі невідповідності розмірів часток, указаних у правовстановлювальних документах, реальним часткам за згодою всіх співвласників здійснюється розрахунок відповідних часток нерухомого майна з метою отримання відповідних правовстановлювальних документів.

Поділ на самостійні об'єкти нерухомого майна повинен відповідати умовам, що передбачені чинними будівельними нормами та провадиться відповідно до законодавства з наданням кожному об'єкту поштової адреси.

При ньому, висновок щодо технічної можливості поділу (виділу) чи об'єднання об'єкта нерухомого майна не є документом, що посвідчує здійснення перетворення об'єкту.

Згідно з підрозділом 4 розділу III Інструкції [6]:

1. Будинок садибного типу може бути поділено на два або більше блокованих будинків шляхом реконструкції.

2. За результатами поділу новоствореним будинкам з відповідними господарськими (допоміжними) будівлями та спорудами присвоюються поштові адреси.

3. У разі поділу будинку садибного типу на окремі квартири внаслідок реконструкції він переходить у статус житлового будинку квартирної типу.

4. Виділення часток співвласників та проведення реконструкції будинку проводяться відповідно до вимог чинного законодавства.

5. Поділ земельної ділянки здійснюється відповідно до вимог статті 56 Закону України «Про землеустрій» з виготовленням технічної документації із землеустрою.

6. Технічний паспорт на блокований будинок як на окремий об'єкт нерухомого майна виготовляється після припинення права спільної часткової та сумісної власності на земельну ділянку та оформлення окремих документів (присвоєння кадастрових номерів) на кожен земельну ділянку.

Законодавчою базою проектування та побудови житлових будинків є Законів України «Про регулювання містобудівної діяльності», «Про архітектурну діяльність», «Про інвестиційну діяльність». «Про будівельні норми». Відповідно до п. 1 ч. 1 ст. 1 Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» [10] під будівництвом розуміється нове будівництво, реконструкція, реставрація, капітальний ремонт об'єкта будівництва.

Згідно до норм ДБН А.2.2-3:2014 «Склад та зміст проектної документації на будівництво» [12] реконструкція – це перебудова прийнятого в експлуатацію існуючого об'єкта, що передбачає зміну його геометричних розмірів та/або функціонального призначення, внаслідок чого відбувається зміна основних техніко-економічних показників, забезпечується удосконалення виробництва, підвищення його техніко-економічного рівня та якості продукції, що виготовляється, поліпшення умов експлуатації та якості послуг.

Реконструкція житлового будинку – це комплекс будівельних робіт, який передбачає демонтаж або монтаж конструкцій з метою розширення площі або перепланування житла з урахуванням індивідуальних потреб власників. Такі роботи можуть припускати знесення господарських будівель, літньої кухні, повна зміна зовнішнього вигляду будинку, добудову мансард, монтаж додаткових віконних, дверних прорізів та приховування непотрібних, добудову нових кімнат та споруд.

Підставами для переведення окремих квартир малоповерхового житлового будинку із окремими земельними ділянками та виходами на них у індивідуальний житловий будинок можуть бути:

- ✓ проведення у встановленому законодавством порядку реконструкції малоповерхового житлового будинку із створенням (поділом) на індивідуальні житлові (садибні) будинки;
- ✓ проведення у встановленому законодавством порядку реконструкції квартири малоповерхового житлового будинку із створенням індивідуального житлового (садибного) будинку;
- ✓ рішення суду.

Відповідно до частини 5 статті 26 Закону «Про регулювання містобудівної діяльності» [10] проектування та будівництво об'єктів здійснюється власниками або користувачами земельних ділянок у такому порядку:

- 1) отримання замовником або проектувальником вихідних даних;
- 2) розроблення проектної документації та проведення у випадках, передбачених статтею 31 цього Закону, її експертизи;
- 3) затвердження проектної документації;
- 3-1) отримання права на виконання підготовчих та будівельних робіт у випадках, визначених цим Законом;
- 4) виконання підготовчих та будівельних робіт;
- 4-1) державна реєстрація спеціального майнового права на об'єкт незавершеного будівництва та майбутній об'єкт нерухомості у випадках, визначених законом;
- 4-2) проведення контрольного геодезичного знімання закінчених будівництвом об'єктів (крім об'єктів, що за класом наслідків (відповідальності) належать до об'єктів з незначними наслідками (СС1)) та здійснення їх технічної інвентаризації (крім об'єктів, перелік яких визначається центральним органом виконавчої влади, що забезпечує формування та реалізує державну політику у сфері будівництва, архітектури, містобудування);
- 5) прийняття в експлуатацію закінчених будівництвом об'єктів;
- 6) державна реєстрація права власності на закінчений будівництвом та прийнятий в експлуатацію у випадках, визначених цим Законом, об'єкт (його складову).

Зміна статусу житлового приміщення з квартири на індивідуальний або блокований житловий будинок можлива лише за умови відповідності об'єкта ознакам житлового будинку (окремий вхід, власні комунікації, земельна ділянка) та без порушення прав інших співвласників. Єдиною процедурою, що забезпечує дотримання цих вимог, виступає реконструкція. Водночас судовий порядок зміни статусу допускається лише за умови незазіхання на неподільне спільне майно багатоквартирного будинку.

У випадку зміни статусу квартири, через яку проходять інженерні комунікації для забезпечення всього будинку, виникає ризик порушення функціонування систем: сама квартира зберігає доступ до необхідних комунікацій, тоді як інші приміщення можуть залишитися без постачання або залежати від можливості доступу до мереж у новоствореному житловому будинку (квартирі зі зміненим статусом).

Реконструкція житлового будинку зумовлює коригування даних містобудівного кадастру та потребує внесення оновленої інформації. До таких змін належать показники площі забудови, загальної площі будівлі, її об'єму та кількості поверхів. Кадастрові дані повинні відображати актуальні технічні характеристики споруди, включаючи використані матеріали, заходи з підвищення енергоефективності та структурні модифікації, що фіксуються у проектній документації.

Крім того, реконструкція може спричинити зміну функціонального призначення будівлі, наприклад, трансформацію житлового об'єкта у комерційний. У кадастрі має бути зафіксована інформація про видані дозволи чи подані повідомлення щодо реконструкції, а також дата завершення відповідних робіт. Оновлення містобудівної документації, її приведення у відповідність до чинних нормативних вимог та форматів зберігання даних є необхідною умовою підтримання актуальності кадастрових відомостей.

Висновки. Реконструкція є динамічним процесом, що викликає цілий ряд змін у характеристиках будівлі та її правовому статусі. Пандемія 2020 року та активна фаза війни 2022 року спонукала людей виїжджати з міських квартир у передмістя, шукаючи індивідуальне житло з ділянкою. Містобудівний кадастр зобов'язаний фіксувати зміни у характеристиках будівлі, включаючи просторові дані (план, висота), атрибутивні дані (технічні характеристики, використання) та

адміністративні дані (дозволи, дати завершення). Регулярне оновлення інформації є критично важливим для забезпечення точності та актуальності містобудівного кадастру для цілей міського планування.

Грунтовно проаналізувавши чинне законодавство, ми виокремили два шляхи переведення квартири в малоповерховому житловому будинку в індивідуальний житловий будинок:

- реконструкція з поділом на індивідуальні житлові будинки: цей варіант передбачає повну зміну статусу всіх квартир в будівлі та їх перетворення на окремі садибні будинки;
- реконструкція окремої квартири: Цей варіант передбачає реконструкцію лише однієї квартири в будівлі з метою перетворення її на індивідуальний садибний будинок.

Оскільки зараз формується Містобудівний кодекс, вважаю що включення реконструкції індивідуальних житлових будинків до містобудівного кадастру України є обґрунтованим та необхідним кроком для забезпечення повноти, актуальності та достовірності даних про міську забудову. Це зумовлено вимогами законодавства у сфері містобудування, значним впливом реконструкції на характеристики будівель та міське середовище, а також потребою в ефективному плануванні та управлінні територіями. Реєстрація реконструкцій сприяє дотриманню будівельних норм і правил, забезпечує облік змін у житловому фонді для цілей оподаткування, планування інфраструктури та дій у надзвичайних ситуаціях. Існуюча правова та процедурна база реконструкції індивідуальних житлових будинків підкреслюють важливість цих інтеграції даних до містобудівного кадастру. Це, у свою чергу, сприятиме підвищенню прозорості та ефективності управління міським розвитком в Україні.

Перелік посилань:

1. Гудзеляк І. Трансформація зони садибної забудови міста Львова (на прикладі мікрорайону Козельники). Економічна та соціальна географія. Київ, 2021. Вип. 86. DOI: <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2021.86.6-15>. https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/11/Hudzeliak_6-15_2021.pdf.
2. Житлові будинки. Основні положення. ДБН В.2.2-15:2019 : Наказ Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 26.03.2019 № 87 // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0087858-19#Text> (дата звернення: 05.02.2026)
3. Планування та забудова територій. ДБН Б.2.2-12:2019 : Наказ Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 26.04.2019 № 104 // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0104858-19#Text>. (дата звернення: 05.02.2026)
4. Проблеми та перспективи розвитку житлової забудови в умовах комплексної реконструкції міста : монографія / [Ю. І. Гайко, Т. В. Жидкова, Т. М. Апатенко та ін.; за заг. ред. Ю. І. Гайка, Т. В. Жидкової] ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 247 с.
5. Про засади державної регуляторної політики у сфері господарської діяльності : Закон України від 11.09.2003 № 1160-IV // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1160-15#Text>. (дата звернення: 06.02.2026)
6. Про затвердження Інструкції про порядок проведення технічної інвентаризації нерухомого майна : Наказ Мінрегіонбуду України від 10.07.2001 №582/5773 // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0582-01> (дата звернення: 07.02.2026)
7. Про затвердження національного класифікатора НК 018:2023 та скасування національного класифікатора ДК 018-2000: Наказ Міністерство економіки України від 16.05.2023 № 3573 // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v3573930-23#Text> (дата звернення: 08.02.2026)
8. Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру: Постанова Кабінету міністрів України від 17.10.2012 № 1051 // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-%D0%BF#n1122> (дата звернення: 09.02.2026).

9. Про особливості здійснення права власності у багатоквартирному будинку : Закон України від 14.05.2015 № 417-VIII // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/417-19#Text> (дата звернення: 09.02.2026).
10. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text> (дата звернення: 10.02.2026).
11. Реконструкція міських територій : підручник / за ред. Т. В. Жидкової, О. В. Завального: Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. 353 с. (Серія «Міське будівництво та господарство»).
12. Склад та зміст проектної документації на будівництво. ДБН А.2.2-3:2014 : Наказ Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 04.06.2014 № 163. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0163858-14#Text> (дата звернення: 11.02.2026).
13. Цивільний кодекс України : Закон України від 16.01.2003 № 435-IV. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text> (дата звернення: 11.02.2026).
14. Щодо алгоритму дій держреєстратора в разі зміни правового статусу нерухомості: Лист Міністерства юстиції України від 18.11.2022 № 109344/8.4/32-22. База даних «Документ». URL: <https://document.vobu.ua/doc/15879> (дата звернення: 12.02.2026).
15. Demkiv, M., Pohranychna, I., Veliiev, M. (2022). Initial data and requirements for residential building reconstruction project. Journal: Academic Journals and Conferences SA, Vol. 4, No. 2, pp. 73–78. DOI: 10.23939/sa2022.02.073

RECONSTRUCTION OF INDIVIDUAL RESIDENTIAL HOUSES: IMPLICATIONS FOR URBAN CADASTRE DATA ACCURACY

Nesterenko Galuna B. Candidate of Economic Sciences, Docent of the Department of Land Cadastre, Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv, Dublyanu, Ukraine, e-mail: galsanesterenko@gmail.com, tel. +38067-6978647, <https://orcid.org/0000-0002-4411-1242>.

Summary. The article aims to highlight the importance of including information about the reconstruction of individual residential houses in the Ukrainian urban cadastre. This inclusion is crucial due to its impact on building density, infrastructure needs, and the legal status of real estate.

To conduct this study, several methods were employed, including a legal analysis of Ukrainian legislation (such as the Civil Code, the Law on Regulation of Urban Development Activities, and the Law on Peculiarities of Exercising Ownership Rights in Multi-Apartment Buildings). Additionally, state-building norms were reviewed, and an urban-planning analysis was performed on cases of apartment-to-house transformations.

The research demonstrates that the reconstruction of residential buildings significantly alters their area, volume, number of floors, and functional purpose, thereby affecting the relevance of urban cadastre data. The study identifies the legal and technical foundations for transforming the status of apartments into detached houses, as well as the challenges associated with land privatization.

A key contribution of this research is the proposed comprehensive approach to reconstruction. This approach views reconstruction not just as a technical modification but also as a transformation of legal status, necessitating systematic documentation in the urban cadastre.

The findings can be utilized to enhance cadastre maintenance procedures, ensure the accuracy of data for territorial development planning, and address co-ownership legal issues during land privatization processes.

Future research should focus on developing methodological recommendations for recording reconstruction data in the urban cadastre and analyzing the socio-economic consequences of housing transformation in light of modern challenges, such as war.

Keywords: urban cadastre, residential building reconstruction, individual residential house, land plot, legal status of real estate.

References

1. Civil Code of Ukraine: Law of Ukraine No. 435-IV (January 16, 2003). Legislation of Ukraine Database. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text> [Accessed: 11.02.2026]. [in Ukrainian].
2. Composition and Content of Design Documentation for Construction. DBN A.2.2-3:2014 (2014). Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine No. 163 (June 4, 2014). Legislation of Ukraine Database. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0163858-14#Text> [Accessed: 11.02.2026]. [in Ukrainian].
3. Demkiv, M., Pohranychna, I., Veliiev, M. (2022). Initial data and requirements for residential building reconstruction project. Journal: Academic Journals and Conferences SA, Vol. 4, No. 2, pp. 73–78. DOI: 10.23939/sa2022.02.073 [in English]
4. Haiko, Yu. I., Zhydkova, T. V., Apatenko, T. M., et al. (2019). *Problems and prospects of residential development under conditions of comprehensive urban reconstruction*. O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv [in Ukrainian].
5. Hudzeliak, I. (2021). Transformation of the detached housing zone of the city of Lviv (a case study of the Kozelnyky neighborhood). *Economic and Social Geography*, 86, 6–15. <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2021.86.6-15>. https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/11/Hudzeliak_6-15_2021.pdf [in Ukrainian].
6. On Approval of the Instruction on the Procedure for Conducting Technical Inventory of Real Estate: Order of the Ministry of Regional Development of Ukraine No. 582/5773 (July 10, 2001). Legislation of Ukraine Database. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0582-01> [Accessed: 07.02.2026]. [in Ukrainian].
7. On Approval of the National Classifier NK 018:2023 and Repeal of the National Classifier DK 018-2000: Order of the Ministry of Economy of Ukraine No. 3573 (May 16, 2023). Legislation of Ukraine Database. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v3573930-23#Text> [Accessed: 08.02.2026]. [in Ukrainian].
8. On Approval of the Procedure for Maintaining the State Land Cadastre: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1051 (October 17, 2012). Legislation of Ukraine Database. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-%D0%BF#n1122> [Accessed: 09.02.2026]. [in Ukrainian].
9. On Peculiarities of Exercising Ownership Rights in an Apartment Building: Law of Ukraine No. 417-VIII (May 14, 2015). Legislation of Ukraine Database. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/417-19#Text> [Accessed: 09.02.2026]. [in Ukrainian].
10. On Regulation of Urban Planning Activities: Law of Ukraine No. 3038-VI (February 17, 2011). Legislation of Ukraine Database. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text> [Accessed: 10.02.2026]. [in Ukrainian].
11. On the Principles of State Regulatory Policy in the Sphere of Economic Activity: Law of Ukraine No. 1160-IV (September 11, 2003). Legislation of Ukraine Database. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1160-15#Text>. [Accessed: 06.02.2026]. [in Ukrainian].
12. Regarding the Algorithm of Actions of a State Registrar in Case of Changes in the Legal Status of Real Estate: Letter of the Ministry of Justice of Ukraine No. 109344/8.4/32-22 (November 18, 2022). Document Database. <https://document.vobu.ua/doc/15879> [Accessed: 12.02.2026]. [in Ukrainian].
13. Residential Buildings. Basic Provisions. DBN V.2.2-15:2019 (2019). Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine No. 87 (March 26, 2019). Legislation of Ukraine Database. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0087858-19#Text> [Accessed: 05.02.2026]. [in Ukrainian].
14. Territory Planning and Development. DBN B.2.2-12:2019 (2019). Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine No. 104 (April 26, 2019). Legislation of Ukraine Database. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0104858-19#Text> [Accessed: 05.02.2026]. [in Ukrainian].
15. Zhydkova, T. V., Zavalnyi, O. V. (Eds.). (2023). *Reconstruction of urban territories*. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. (Series “Urban Construction and Economy”) [in Ukrainian].

Дата надходження до редакції 23.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 05.02.2026.

УДК 528:332.3:502.4
UDC 528:332.3:502.4

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-143-151

ІНДИКАТОРИ ГЕОЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПОСТРАЖДАЛИХ ТЕРИТОРІЙ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

INDICATORS OF GEOECOLOGICAL SAFETY OF AFFECTED TERRITORIES OF TERRITORIAL COMMUNITIES



Нестеренко Сергій Григорович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна,
e-mail: Nesterenkosg34@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5124-9728>



Байстрок Олександра Володимирівна, аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна,
e-mail: Sasha140422@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-4458-4929>



Демочко Іван Олександрович, аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна,
e-mail: Ivandema00000@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-0218-2285>



Мусієнко Костянтин Анатолійович, аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна,
e-mail: Kostiantyn.Musienko@kname.edu.ua

<https://orcid.org/0009-0006-2811-1054>

Анотація: У статті розглянуто теоретико-методичні підходи до оцінювання геоекологічної безпеки постраждалих територій територіальних громад України в умовах інтенсивного антропогенного навантаження та воєнних дій. Узагальнено сучасні уявлення про сутність поняття «геоекологічна безпека» та «постраждала територія», проаналізовано існуючі системи індикаторів

екологічного стану довкілля на міжнародному та національному рівнях. Запропоновано структурування індикаторів геоекологічної безпеки за блоками: природно-ресурсний, техногенно-екологічний, соціально-демографічний та інституційний. Сформовано перелік ключових кількісних та якісних показників, придатних для інтегральної оцінки стану геоекологічної безпеки постраждалих територій територіальних громад, та наведено приклади їхнього використання. Окреслено можливості застосування запропонованої системи індикаторів при плануванні відновлення, просторового розвитку та екологічної реабілітації територіальних громад.

Ключові слова: геоекологічна безпека, постраждалі території, територіальні громади, індикатори, моніторинг довкілля, інтегральна оцінка.

Вступ. Події останніх десятиліть в Україні – зростання техногенного навантаження, кліматичні зміни, а також повномасштабна військова агресія РФ – призвели до суттєвого підвищення рівня екологічних ризиків для територіальних громад. Значні площі земель зазнали деградації, забруднення ґрунтів, поверхневих та підземних вод, руйнування інженерної та екологічної інфраструктури, що обумовлює формування широкого спектра геоекологічних загроз.

В таких умовах особливої актуальності набуває проблема розроблення науково обґрунтованих підходів до оцінювання геоекологічної безпеки постраждалих територій територіальних громад. Необхідною передумовою такої оцінки є формування системи індикаторів, здатних відображати як поточний стан природного середовища, так і динаміку ризиків для населення, інфраструктури та природних екосистем.

Наявні методики екологічного моніторингу часто орієнтовані на загальнодержавний або регіональний рівень і не враховують просторову диференціацію впливів у межах окремих громад, специфіку локальних видів забруднення, наслідки бойових дій та вторинні ефекти (міграція населення, зміна структури землекористування, руйнування інженерних мереж тощо). Це ускладнює прийняття управлінських рішень на рівні органів місцевого самоврядування.

Отже, актуальною науковою та практичною задачею є формування системи індикаторів геоекологічної безпеки постраждалих територій територіальних громад, адаптованої до умов України та придатної для інтеграції в місцеві стратегії просторового розвитку й відновлення.

Матеріали та методи. У дослідженні використано нормативно-правові акти України та міжнародні документи, що регламентують охорону довкілля, відновлення постраждалих територій та управління екологічними ризиками, а також аналітичні звіти, наукові публікації та статистичні дані щодо стану навколишнього природного середовища в умовах воєнного впливу. Методи дослідження включають порівняльний аналіз існуючих систем індикаторів, системний підхід до оцінювання геоекологічної безпеки, використання геоінформаційних технологій для картографування екологічних ризиків, а також експертні оцінки для визначення пріоритетних індикаторів безпеки постраждалих територіальних громад.

Метою роботи є формування науково обґрунтованої системи індикаторів геоекологічної безпеки постраждалих територій територіальних громад та окреслення можливостей її застосування в практиці місцевого управління й планування відновлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Уточнити зміст поняття «геоекологічна безпека постраждалих територій територіальних громад» та визначити основні групи загроз.
2. Проаналізувати існуючі підходи до побудови систем індикаторів екологічного стану та екологічної безпеки на міжнародному та національному рівнях.
3. Запропонувати структуру системи індикаторів геоекологічної безпеки постраждалих територій за основними блоками.
4. Сформувати перелік ключових індикаторів (кількісних та якісних) для кожного блоку, придатних для використання на рівні територіальних громад.
5. Навести приклади застосування індикаторів у вигляді узагальнюючих таблиць та обґрунтувати можливості інтеграції системи індикаторів в процеси планування відновлення та просторового розвитку громад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання теорії й практики оцінки екологічного стану довкілля та екологічної безпеки розроблялися багатьма вітчизняними та зарубіжними науковцями. Важливими концептуальними засадами стали принципи сталого розвитку та управління природними ресурсами, сформульовані у доповідях та документах ООН, Програми ООН з довкілля (UNEP), Всесвітнього банку та інших міжнародних організацій [1–2].

В міжнародній практиці набули поширення підходи до побудови систем індикаторів довкілля, зокрема модель DPSIR (Driving forces – Pressures – State – Impact – Responses), що використовується Європейським агентством з довкілля [3]. Для оцінки екологічної безпеки застосовуються різноманітні набори індикаторів як на глобальному, так і на національному рівні [4].

У вітчизняній науковій літературі питання екологічної та геоекологічної безпеки розглядалися в роботах, присвячених оцінюванню техногенного навантаження, стану природно-ресурсного потенціалу, просторовому плануванню, сталому розвитку територій [5–8]. В останні роки з'являються дослідження, орієнтовані на оцінку екологічних наслідків воєнних дій, забруднення ґрунтів та вод вибухонебезпечними предметами, нафтопродуктами, важкими металами, руйнування екосистем [9].

Разом з тим, більшість існуючих підходів [7, 8] орієнтовані на загальнодержавний/регіональний рівень і не деталізовані до масштабу територіальної громади. Інші [10, 11] мають галузевий характер (наприклад, оцінка стану водних ресурсів, ґрунтів, атмосферного повітря) без інтеграції в єдину систему геоекологічної безпеки постраждалих територій. В роботах [12, 13] недостатньо враховують соціально-демографічні та інституційні аспекти безпеки, що є ключовими для територіальних громад у процесі відновлення.

Таким чином, наявні напрацювання створюють теоретичну базу для розроблення системи індикаторів геоекологічної безпеки, але залишаються невирішеними питання адаптації цих індикаторів до специфіки постраждалих територій та управлінських потреб місцевого самоврядування.

Виклад основного матеріалу. Геоекологічна безпека постраждалих територій територіальних громад є інтегральною характеристикою стану території, що відображає рівень екологічних ризиків для населення, господарської діяльності та природних екосистем за умов дії як традиційних антропогенних чинників, так і специфічних впливів, пов'язаних із воєнними діями. У сучасних вітчизняних реаліях воєнний фактор суттєво трансформував структуру ризиків, масштаб і глибину геоекологічних порушень, що особливо гостро проявляється на локальному рівні – рівні територіальних громад. У межах громад поєднуються пошкоджені промислові об'єкти, зруйнована житлова забудова, заміновані сільськогосподарські угіддя, деградовані лісові масиви, фрагментовані природні екосистеми, що створює складну мозаїку зон небезпеки різної інтенсивності. Зазначені наслідки зумовлюють необхідність описового аналізу ситуації та розробки формалізованої системи індикаторів геоекологічної безпеки, яка дозволить об'єктивно оцінювати стан територій, здійснювати порівняння між громадами, відстежувати динаміку та планувати заходи відновлення.

Постраждалі території вирізняються високим ступенем антропогенної трансформації природних ландшафтів. Механічне руйнування ґрунтового покриву унаслідок обстрілів, вибухів, будівельних обвалів, риття окопів і траншей супроводжується формуванням численних техногенних мікрорельєфних форм — воронок, насипів, впадин, техногенних схилів. Такі форми спричиняють зміну поверхневого стоку, локальне перезволоження або, навпаки, надмірне висушування ґрунтів, утворення застійних вод, що сприяє накопиченню забруднювачів. Порушення природних ґрунтових горизонтів, руйнування гумусового шару та ущільнення ґрунтів технікою призводять до зниження родючості та погіршення фізичних властивостей ґрунту, що ускладнює подальшу рекультивацию та відновлення аграрного потенціалу територіальних громад.

До суто механічних порушень додається хімічне забруднення. Вибухи боєприпасів супроводжуються утворенням значної кількості сполук азоту, сірки, важких металів, органічних токсикантів. У районах руйнування промислових об'єктів та складів паливно-мастильних матеріалів до ґрунтів і вод потрапляють нафтопродукти, розчинники, технологічні масла, реагенти, які використовувалися в технологічних процесах. Це призводить до формування стійких плям

забруднення, що можуть мігрувати вглиб ґрунтового профілю та в підземні води. Додатковим джерелом забруднення є руїни будівель, у яких містяться залишки фарб, лаків, пластмас, полімерів, азбестових матеріалів, елементів електроніки, що при руйнуванні та спалюванні переходять у ґрунт, воду й повітря у вигляді твердих частинок, пилу та газоподібних сполук.

Важливим специфічним чинником для багатьох громад України є мінно-вибухова небезпека. Замінування територій, наявність нерозірваних боєприпасів, касетних елементів, протипіхотних і протитанкових мін створює безпосередню загрозу для населення та значною мірою обмежує можливості дослідження та екологічного моніторингу. Частина території фактично стає «білою плямою» для екологічних обстежень: доступ туди обмежений, а отже, дані про реальний стан ґрунтів, вод, рослинності залишаються фрагментарними. Це ускладнює формування повної картини геоекологічної безпеки. Площа замінованих територій, щільність локалізації вибухонебезпечних предметів, темпи гуманітарного розмінування виступають важливими індикаторами ризику та динаміки його зниження.

Суттєво трансформується і структура землекористування територіальних громад. Частина земель тимчасово виводиться із сільськогосподарського обробітку через мінну небезпеку, забруднення, руйнування меліоративних систем, втрату економічної доцільності. Інші ділянки, навпаки, зазнають надмірного навантаження через концентрацію тимчасового житла, складів, ремонтних баз, пунктів логістики. Це призводить до нерівномірного розподілу навантаження на довкілля, формування локальних осередків забруднення та деградації, які не завжди відображаються у «середніх по громаді» показниках, але є критичними на локальному рівні окремих сіл, мікрорайонів чи промзон.

Водні ресурси постраждалих громад змінюються не лише за якісними, а й за кількісними параметрами. Руйнування або пошкодження гідротехнічних споруд, дамб, водопроводів, каналізаційних мереж і очисних станцій призводить до несанкціонованих скидів стічних вод, втрати контрольованості режиму водокористування, змін у гідрологічних характеристиках малих річок, каналів, ставків. У багатьох випадках у поверхневі водні об'єкти потрапляють змішані потоки побутових, промислових, дощових стічних вод, що спричиняє евтрофікацію, цвітіння водоростей, зниження вмісту розчиненого кисню, загибель іхтіофауни та інших гідробіонтів. Погіршення якості води у поверхневих водних об'єктах поблизу населених пунктів безпосередньо позначається на стані підземних вод, які часто слугують джерелом питного водопостачання через колодязі та свердловини. Таким чином, погіршення якісних показників води стає не лише екологічною, а й медико-соціальною проблемою, яка має бути відображена у відповідних індикаторах геоекологічної безпеки.

Атмосферне повітря на постраждалих територіях характеризується підвищеними концентраціями пилу, сажі, оксидів азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки, летких органічних сполук, у тому числі канцерогенних. Джерелами забруднення виступають пожежі складів пального, промислових об'єктів, лісів і сухої рослинності, вибухи боєприпасів, транспортні потоки, мобільні джерела енергопостачання, знищена та неприбрана будівельна маса. На тлі зменшення площ зелених насаджень у містах і селах (через вирубки, пожежі, механічні пошкодження дерев) знижується здатність ландшафтів до осадження пилу й очищення повітря. У результаті формуються своєрідні «кишені» забруднення, де мешканці зазнають тривалого впливу токсичних аерозолів. У системі індикаторів доцільно враховувати середньорічні концентрації основних забруднювачів (PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO), а також частоту випадків перевищення гранично допустимих концентрацій у населених пунктах громади.

Соціально-демографічний вимір геоекологічної безпеки безпосередньо пов'язаний із просторовою структурою ризиків. Населення, яке проживає в зонах підвищеного геоекологічного навантаження, стає більш уразливим до негативних наслідків забруднення довкілля. Це насамперед стосується дітей, людей похилого віку, вагітних жінок, осіб з хронічними захворюваннями, внутрішньо переміщених осіб, які часто мешкають у тимчасових або недостатньо придатних для тривалого проживання приміщеннях. Висока щільність проживання в районах із забрудненим повітрям, забрудненою водою, відсутністю зелених насаджень та рекреаційних просторів веде до зростання рівня

захворюваності на хвороби органів дихання, серцево-судинні та психосоматичні розлади. Ці показники мають включатися до системи індикаторів як такі, що відображають вплив стану довкілля на здоров'я населення.

Інституційний вимір геоекологічної безпеки відображає спроможність територіальної громади управляти екологічними ризиками, планувати й реалізовувати заходи з відновлення, вести системний моніторинг довкілля та забезпечувати участь громадськості в ухваленні рішень. Наявність стратегічних документів (стратегій розвитку громади, планів просторового розвитку, екологічних програм, планів дій щодо змін клімату, програм поводження з відходами), реальний рівень їх імплементації, обсяги фінансування природоохоронних заходів із місцевого бюджету, кількість та якість реалізованих проєктів з рекультивації, розмінування, відновлення лісів, малих річок, зеленої інфраструктури має бути переведено в систему індикаторів, що вимірюють «управлінську відповідь» на геоекологічні проблеми.

З метою узагальнення та уніфікації наведених аспектів доцільно формувати систему індикаторів геоекологічної безпеки постраждалих територій за блоковим принципом, виділяючи природно-ресурсний, техногенно-екологічний, соціально-демографічний та інституційний блоки. Результати такої систематизації наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати систематизації індикаторів геоекологічної безпеки постраждалих територій територіальної громади

Table 1 – Results of systematization of geoeological safety indicators of affected territories of the territorial community

Блок	Підблок / аспект	Індикатор	Одиниця виміру	Тип індикатора (стан / тиск / вплив / відповідь)
1	2	3	4	5
Природно-ресурсний	Земельні ресурси	Частка деградованих та забруднених земель у загальній площі громади	%	стан
Природно-ресурсний	Земельні ресурси	Площа замінованих територій	га	тиск/ризик
Природно-ресурсний	Водні ресурси	Якість поверхневих вод (клас за індексом якості)	клас	стан
Природно-ресурсний	Атмосферне повітря	Середньорічна концентрація РМ _{2.5} у населених пунктах	мкг/м ³	стан
Техногенно-екологічний	Джерела забруднення	Кількість потенційно небезпечних об'єктів	од.	тиск
Техногенно-екологічний	Відходи	Обсяг утворення будівельних та небезпечних відходів	т/рік	тиск
Соціально-демографічний	Ризики для населення	Чисельність населення в зонах підвищеного ризику	осіб	вплив
Соціально-демографічний	Здоров'я	Захворюваність на хвороби дихальної системи	випадків на 100 тис. осіб	вплив
Інституційний	Управління	Наявність затвердженої програми з екологічної безпеки (0 – ні, 1 – так)	0/1	відповідь
Інституційний	Фінанси	Обсяг фінансування природоохоронних заходів із місцевого бюджету на душу населення	грн/особу	відповідь

На практиці реалізація такої системи індикаторів потребує чітко організованого процесу збору, обробки, зберігання та аналізу даних. На першому етапі формується перелік джерел інформації: офіційна державна статистика, звітність підприємств, результати вимірювань державних і регіональних систем моніторингу довкілля, матеріали екологічних обстежень, дані дистанційного зондування Землі, медична статистика, відомості служб з надзвичайних ситуацій, матеріали громадського моніторингу та громадських ініціатив. Особливу роль відіграють геоінформаційні системи, які дозволяють локалізувати дані в просторі та будувати карти ризиків.

Другим етапом є нормування первинних показників. Оскільки індикатори вимірюються в різних одиницях (від відсотків і гектарів до мікрограмів на кубічний метр чи гривень на особу), виникає потреба привести їх до безрозмірної форми, наприклад до шкали від 0 до 1. Це може здійснюватися за допомогою лінійного нормування, використання граничних допустимих значень (як орієнтирів «добре/погано»), а також через експертне визначення порогових рівнів. Важливо враховувати, що для частини індикаторів «більше означає гірше» (наприклад, площа забруднених земель, концентрація забруднювачів у повітрі, захворюваність), а для інших — навпаки, «більше означає краще» (обсяг фінансування природоохоронних заходів, кількість реалізованих проєктів відновлення). При нормуванні це відображається у виборі відповідної функції перетворення.

Третім етапом є агрегування індикаторів за блоками. Тут важливо визначити ваги окремих індикаторів, які відображають їх відносну важливість для оцінки геоекологічної безпеки. Наприклад, для природно-ресурсного блоку більшої ваги можуть набувати показники, безпосередньо пов'язані з питною водою та якістю повітря, оскільки вони мають прямий вплив на здоров'я людей. Для техногенно-екологічного блоку важливими можуть бути показники кількості потенційно небезпечних об'єктів і частоти надзвичайних ситуацій. Для соціально-демографічного блоку — частка населення в зонах ризику та захворюваність на екологічно зумовлені хвороби. Для інституційного — наявність та реальне функціонування системи моніторингу, програм, джерел фінансування.

Після розрахунку інтегральних показників за блоками формують загальний інтегральний показник геоекологічної безпеки постраждалої територіальної громади. Приклад такої інтегральної оцінки наведено в таблиці 2, де умовні значення індикаторів агреговані до блоків і загального показника.

Таблиця 2 – Приклад інтегральної оцінки геоекологічної безпеки за основними блоками
Table 2 – Example of an integrated assessment of geoeological safety by main blocks

Блок індикаторів	Перелік індикаторів (умовне позначення)	Метод агрегування	Інтегральний бал (0–1)	Рівень геоекологічної безпеки*
Природно-ресурсний	I ₁ – деградовані землі; I ₂ – якість вод; I ₃ – стан повітря; I ₄ – фрагментація екосистем	Нормування та середньозважене	0,35	низький
Техногенно-екологічний	I ₅ – небезпечні об'єкти; I ₆ – відходи; I ₇ – аварійність	Нормування та середнє	0,40	низький
Соціально-демографічний	I ₈ – населення в зонах ризику; I ₉ – захворюваність; I ₁₀ – вразливі групи	Нормування, зважене за значущістю	0,45	середній-низький
Інституційний	I ₁₁ – програми; I ₁₂ – фінансування; I ₁₃ – проєкти; I ₁₄ – моніторинг	Нормування та середньозважене	0,60	середній
Загальний інтегральний показник	–	Агрегування блоків за вагами	0,45	задовільний/ризиковий

* Рівні безпеки можуть бути градуйовані як: 0–0,3 – критично низький; 0,31–0,5 – низький/ризиковий; 0,51–0,7 – середній; 0,71–0,9 – підвищений; 0,91–1,0 – високий.

Застосування інтегрального показника дозволяє кількісно оцінити загальний стан геоекологічної безпеки громади та використовувати його як інструмент для порівняльного аналізу між різними територіальними громадами, формування «рейтингу» за рівнем безпеки, визначення пріоритетів для державної підтримки та міжнародної технічної допомоги. У практичній роботі з планування відновлення та просторового розвитку слід поєднувати використання інтегральних оцінок із детальними картами ризиків, профільними аналітичними звітами, залученням експертної думки.

У перспективі система індикаторів геоекологічної безпеки постраждалих територій територіальних громад може стати базою для формування цифрових панелей моніторингу, інтерактивних карт і відкритих екологічних реєстрів, що створить передумови для прозорого управління, підзвітності органів влади, активнішої участі громадян у прийнятті рішень та посилення довіри між владою, громадою й міжнародними партнерами. В умовах тривалого відновлення країни така система індикаторів виконуватиме діагностичну та прогностичну функцію, дозволяючи моделювати різні сценарії просторового розвитку, оцінювати екологічні наслідки нових проєктів, інтегрувати принципи сталого розвитку в повсякденну практику управління територіальними громадами.

Висновки. Проведене дослідження засвідчило, що геоекологічна безпека постраждалих територіальних громад є складною багатофакторною системою, яка відображає взаємодію природних процесів, техногенних впливів, соціальних характеристик населення та управлінських можливостей громади. Отримані результати показують, що на постраждалих територіях формується специфічний тип екологічних ризиків, відмінний від класичного антропогенного навантаження, описаного у фундаментальних працях з екологічної безпеки. Значна частина територій зазнала механічних і хімічних руйнувань, замінування та техногенного забруднення, що узгоджується із сучасними дослідженнями екологічних наслідків конфліктів.

Блокова система індикаторів відповідає міжнародним стандартам оцінювання стану довкілля і дозволяє інтегрувати різноманітні параметри в єдину модель. На відміну від традиційних методик, вона враховує як природно-ресурсний, так і соціально-демографічний та інституційний компоненти, що робить її універсальною для територіальних громад.

Результати аналізу свідчать, що природно-ресурсний блок є найбільш вразливим до воєнних впливів: деградація ґрунтів, забруднення вод, погіршення якості повітря підтверджуються як науковими роботами, так і міжнародними звітами. Техногенно-екологічний блок характеризується наявністю великих обсягів небезпечних відходів, руйнування промислових об'єктів та мінно-вибухової небезпеки. Соціально-демографічні наслідки проявляються у погіршенні здоров'я населення, що підтверджено узагальненими медико-екологічними даними.

Інституційна спроможність громад визначає здатність до відновлення: наявність стратегічних програм, екологічних паспортів, систем моніторингу, фінансування та партнерств з міжнародними організаціями є важливими для успіху відбудови.

Отже, система індикаторів геоекологічної безпеки, представлена у статті, може слугувати основою для створення регіональних та локальних екологічних моніторингових систем, розвитку цифрових інструментів управління та ухвалення рішень у сфері просторового планування. Вона дозволяє своєчасно виявляти екологічні загрози, формувати пріоритети відновлення та забезпечувати сталий розвиток територіальних громад у післявоєнний період.

Перелік посилань

1. UN Environment Programme. Global Environment Outlook. – Nairobi: UNEP.
2. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. – New York: UN, 2015.
3. European Environment Agency. Environmental indicators: Typology and overview. – Copenhagen: EEA, 1999.

4. Bossel H. *Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications*. – Winnipeg: IISD, 1999.
5. Нестеренко С. Г., Радзінська Ю. Б., Кондратюк І. В., Халіков С. А. Інструментальні методи моніторингу земель міст. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2023. Т. 3, Вип. 177. С. 98–103. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-98-103>
6. Нестеренко С. Г., Радзінська Ю. Б., Касьянов В. В., Головачов В. В., Фролов В. О. Дослідження напрямів розробки землепорядної документації з урахуванням сучасних нормативно-правових вимог. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2022. Т. 1, Вип. 168. С. 69–74. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-1-168-69-74>
7. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національні доповіді про стан навколишнього природного середовища України за 2015–2023 рр.
8. Державна служба статистики України. Статистичний щорічник України (розділи «Охорона навколишнього природного середовища»), різні роки.
9. Pashkevych N., Vasyliuk O., *Журнал про екологічні наслідки війни. Ukraine War Environmental Consequences Work Group. Випуск 10. Українською*; DOI:[10.13140/RG.2.2.23695.25761](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23695.25761), Електронний ресурс: https://www.researchgate.net/publication/369824123_Zurnal_pro_ekologicni_naslidki_vijni_Ukraine_War_Environmental_Consequences_Work_Group_Vipusk_10_Ukrainskou
10. Petrakovska O. Lizunova A. Urban planning in private property conditions in Ukraine. *International Academic Group On Planning, Law And Property Rights*. Third Conference. Aalborg, Denmark – 11-13.th February 2009, planninglaw2009.land.aau.dk/doc/.
11. W Mingming, S Nesterenko, E Shterndok. Modelling of the Parcel Pattern Impact. *International science and technology conference "Earth science"* : IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 272 (2019) 032085 doi:10.1088/1755-1315/272/3/032085
12. Губар Ю. Впровадження методики кластеризації для побудови економіко-математичних регресивних моделей оцінки нерухомості. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*. Міжвідомчий наук.-техн. зб. – 2015. – № 82 – С. 110-135.
13. The research of the impact of environmental factors on the use of underground real estate. K Mamonov, S Nesterenko, V Frolov, V Troyan. European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020»*, Dec 2020, Volume 2020, p.1 – 5 DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205739>

INDICATORS OF GEOECOLOGICAL SAFETY OF AFFECTED TERRITORIES OF TERRITORIAL COMMUNITIES

Nesterenko Serhii, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov, Kharkiv, Ukraine, e-mail: Nesterenskog34@gmail.com, tel.+380669291752, <https://orcid.org/0000-0001-5124-9728>.

Baistruk Oleksandra V., Ph.D. student at the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov, Kharkiv, Ukraine, e-mail: Sasha140422@gmail.com, tel.+380679230113, <https://orcid.org/0009-0009-4458-4929>.

Demochko Ivan O., Ph.D. student at the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov, Kharkiv, Ukraine, e-mail: Ivandema00000@gmail.com, tel.+380666314388, <https://orcid.org/0009-0002-0218-2285>.

Musiienko Kostiantyn A., Ph.D. student at the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov, Kharkiv, Ukraine, e-mail: Kostiantyn.Musiienko@kname.edu.ua, tel. +380983472813, <https://orcid.org/0009-0006-2811-1054>

Summary. The article considers theoretical and methodological approaches to assessing the geo-ecological safety of affected territories of territorial communities of Ukraine in conditions of intense anthropogenic load and military actions. It summarises current ideas about the essence of the concepts of ‘geo-

ecological safety' and 'affected territory' and analyses existing systems of indicators of the ecological state of the environment at the international and national levels. A structuring of geo-ecological safety indicators by blocks is proposed: natural resources, technogenic-ecological, socio-demographic, and institutional. A list of key quantitative and qualitative indicators suitable for the integrated assessment of the geo-ecological safety of affected territories of territorial communities is formed, and examples of their use are given in the form of tables. The possibilities of applying the proposed system of indicators in planning the restoration, spatial development and ecological rehabilitation of territorial communities are outlined.

Keywords: geo-ecological safety, affected territories, territorial communities, indicators, environmental monitoring, integrated assessment.

References

1. UN Environment Programme. Global Environment Outlook. – Nairobi: UNEP.
2. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. – New York: UN, 2015.
3. European Environment Agency. Environmental indicators: Typology and overview. – Copenhagen: EEA, 1999.
4. Bossel H. *Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications*. – Winnipeg: IISD, 1999.
5. Nesterenko S. G., Radzinska Y. B., Kondratyuk I. V., Khalikov S. A. Instrumental methods for monitoring urban land. *Municipal Economy of Cities. Series: Technical Sciences and Architecture*. 2023. Vol. 3, Issue 177. Pp. 98–103. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-98-103>. [in Ukrainian].
6. Nesterenko S. G., Radzinska Yu. B., Kasyanov V. V., Golovachov V. V., Frolov V. O. Research into directions for the development of land management documentation, taking into account current regulatory and legal requirements. *Municipal Economy of Cities. Series: Technical Sciences and Architecture*. 2022. Vol. 1, Issue 168. P. 69–74. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-1-168-69-74>. [in Ukrainian].
7. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. National reports on the state of the environment in Ukraine for 2015–2023. [in Ukrainian].
8. State Statistics Service of Ukraine. Statistical Yearbook of Ukraine (sections on environmental protection), various years. [in Ukrainian].
9. Pashkevych N., Vasyliuk O., 'Journal on the Environmental Consequences of War. Ukraine War Environmental Consequences Work Group. Issue 10. In Ukrainian'; DOI:10.13140/RG.2.2.23695.25761, Electronic resource: https://www.researchgate.net/publication/369824123_Zurnal_pro_ekologicni_naslidki_vijni_Ukraine_War_Environmental_Consequences_Work_Group_Vipusk_10_Ukrainskou
10. Petrakovska O. Lizunova A. Urban planning in private property conditions in Ukraine. *International Academic Group On Planning, Law And Property Rights*. Third Conference. Aalborg, Denmark – 11-13 February 2009, planninglaw2009.land.aau.dk/doc/.
11. W Mingming, S Nesterenko, E Shterndok. Modelling of the Parcel Pattern Impact. *International science and technology conference 'Earth science'*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 272 (2019) 032085 doi:10.1088/1755-1315/272/3/032085
12. Gubar Yu. Implementation of clustering methods for building economic and mathematical regression models for real estate valuation. *Geodesy, cartography and aerial photography*. Interdepartmental scientific and technical collection. – 2015. – No. 82 – P. 110-135. [in Ukrainian].
13. The research of the impact of environmental factors on the use of underground real estate. K Mamonov, S Nesterenko, V Frolov, V Troyan. European Association of Geoscientists & Engineers. *Conference Proceedings, International Conference of Young Professionals 'GeoTerrace-2020'*, Dec 2020, Volume 2020, p.1 – 5 DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205739>

Дата надходження до редакції 9.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 01.02.2026.

**ПРОВІДНІ ЕКОНОМІЧНІ СТРАТЕГІЇ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ ОНОВЛЕННЯ
БУДІВЕЛЬНИХ ПІДРЯДНИХ ПІДПРИЄМСТВ ЧЕРЕЗ ПРОЄКТ ЦІЛЬОВОГО
РЕІНЖІНІРИНГУ**

**LEADING ECONOMIC STRATEGIES FOR IMPLEMENTING RENEWAL MEASURES IN
CONSTRUCTION CONTRACTING ENTERPRISES THROUGH A TARGETED
REENGINEERING PROJECT. RESEARCH HYPOTHESIS**



Алексєєнко Владислав Олександрович, аспірант кафедри менеджменту в будівництві, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, e-mail: aleksieienko_vo-2024@knuba.edu.u, тел.: +380683613334

<https://orcid.org/0009-0007-5909-8283>

Анотація. Провідні економічні стратегії впровадження заходів оновлення будівельних підприємств через проєкт цільового реінжинірингу розглядаються як інструмент системної трансформації галузевих суб'єктів господарювання в умовах зростаючої турбулентності ринкового середовища. Посилення конкуренції, підвищення вартості матеріальних та енергетичних ресурсів, ускладнення логістичних ланцюгів, цифровізація управління та зростання вимог до енергоефективності й екологічної відповідальності формують нову конфігурацію економічних викликів для будівельних підприємств. За таких умов традиційні підходи до оптимізації діяльності, що ґрунтуються на часткових організаційних удосконаленнях, виявляються недостатніми для забезпечення довгострокової фінансової стійкості та конкурентоспроможності.

Оновлення підприємств трактується як багаторівневий процес структурної, процесної та фінансово-економічної перебудови, спрямованої на формування адаптивної моделі функціонування. Йдеться про глибоку трансформацію управлінської архітектури, що включає перегляд стратегічних орієнтирів, оптимізацію виробничих і забезпечувальних процесів, зниження транзакційних витрат, інтеграцію цифрових інструментів контролю та аналітичної підтримки прийняття рішень. Такий підхід забезпечує узгодженість між операційними діями, фінансовими результатами та стратегічними цілями розвитку підприємства.

Цільовий реінжиніринг визначається як механізм радикального перепроєктування бізнес-процесів, орієнтований на досягнення конкретних економічних результатів — зростання продуктивності, стабілізації грошових потоків, підвищення рентабельності та мінімізації ризиків реалізації будівельних проєктів. На відміну від класичних моделей удосконалення, цільовий реінжиніринг передбачає синхронізацію організаційних, технологічних і фінансових змін у межах єдиної стратегічної програми трансформації. Наукова гіпотеза ґрунтується на припущенні, що інтеграція організаційних, технологічних і аналітичних інструментів управління у межах проєкту цільового реінжинірингу забезпечує синергетичний економічний ефект.

Ключові слова: реінжиніринг, економічні стратегії, будівельні підприємства, оновлення, підприємні організації, управління проєктами, інновації, конкурентоспроможність.

Вступ. В умовах глобалізації та інтеграції економік особливо актуальним стає питання адаптації бізнес-моделей підрядних підприємств до нових умов функціонування. Реінжиніринг, як концепція цілеспрямованого перетворення бізнес-процесів, надає можливість оновити підходи до управління, оптимізувати структури та підвищити ефективність роботи компаній. У цьому контексті, метою даного дослідження є визначення та аналіз провідних економічних стратегій впровадження заходів оновлення будівельних підрядних підприємств через проєкт цільового реінжинірингу. Це дослідження передбачає не лише виявлення актуальних методів і інструментів реінжинірингу, але й розробку рекомендацій щодо їх практичного застосування для покращення операційної ефективності підприємств.

Наукова гіпотеза роботи полягає в тому, що впровадження цільового реінжинірингу в будівельних підрядних підприємствах може суттєво підвищити їх конкурентоспроможність та ефективність за рахунок оптимізації бізнес-процесів, адаптації до змінних умов ринку та інтеграції інноваційних технологій. Дослідження сприятиме формуванню теоретичних основ та практичних рекомендацій щодо управлінських стратегій, що реалізуються в умовах сучасного будівельного сектору. Тобто, результатом роботи має стати систематизація знань про впровадження економічних стратегій, що сприятимуть оновленню будівельних підрядних підприємств, а також розвиток рекомендацій, які можуть бути реалізовані на практиці для підвищення ефективності їх діяльності.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю формування ефективних економічних стратегій модернізації підрядних структур через механізм цільового реінжинірингу, який дозволяє здійснювати радикальну перебудову бізнес-процесів із орієнтацією на досягнення стратегічних результатів. В умовах цифровізації та переходу до принципів сталого розвитку реінжиніринг набуває нового змісту — він поєднує оптимізацію витрат, підвищення продуктивності та інтеграцію аналітичних інструментів управління.

Метою роботи є обґрунтування провідних економічних стратегій впровадження заходів оновлення будівельних підрядних підприємств через проєкт цільового реінжинірингу та формування наукової гіпотези щодо досягнення синергетичного ефекту від інтеграції організаційних, технологічних і аналітичних механізмів управління.

Виклад основного матеріалу. В умовах сучасного економічного середовища, яке характеризується високою конкуренцією, змінами технологій та зростаючими вимогами споживачів, будівельні підрядні підприємства стикаються з необхідністю постійного оновлення своїх бізнес-процесів. Провідні економічні стратегії впровадження заходів оновлення, зокрема через цільовий реінжиніринг, стають ключовими для досягнення конкурентних переваг.

Цільовий реінжиніринг передбачає глибоке переосмислення існуючих бізнес-процесів з метою їх оптимізації, зменшення витрат і підвищення ефективності. Цей підхід стає особливо актуальним у будівельній галузі, де витрати та строки виконання робіт безпосередньо впливають на прибутковість підприємства. У цій статті розглянемо провідні економічні стратегії, що використовуються для впровадження оновлення в будівельних підрядних підприємствах, а також наукову гіпотезу, яка стверджує, що цільовий реінжиніринг може суттєво підвищити ефективність їх діяльності.

Будівельна галузь є важливою складовою економіки будь-якої країни, і вона впливає на багато інших секторів, зокрема на виробництво матеріалів, інженерні послуги, транспорт та інфраструктуру. Зважаючи на швидкий розвиток технологій, зміни в законодавстві та зростаючі екологічні вимоги, підприємства цього сектора повинні впроваджувати нові стратегії, щоб залишатися конкурентоспроможними. Дослідження показують, що більшість будівельних компаній, які успішно впроваджують інновації та здійснюють реінжиніринг процесів, отримують кращі фінансові результати. Це свідчить про важливість адаптації до змін та постійного оновлення в умовах конкурентного середовища.

Однією з основних стратегій, яка використовується для оновлення будівельних підрядних підприємств, є стратегія інновацій. Вона передбачає впровадження нових технологій, матеріалів та методів роботи. Інновації можуть проявлятися в різних формах: від використання новітніх будівельних матеріалів до застосування нових технологій управління проектами. Інноваційні стратегії допомагають підприємствам не лише підвищити якість продукції, а й зменшити витрати, скоротити терміни

виконання робіт та збільшити задоволеність клієнтів. Наприклад, використання BIM-технологій (інформаційного моделювання будівель) дозволяє оптимізувати процеси проектування та будівництва, зменшуючи кількість помилок і підвищуючи ефективність використання ресурсів [1].

Диверсифікація є ще одним важливим напрямком для оновлення будівельних підрядних підприємств. Ця стратегія передбачає розширення асортименту послуг або вихід на нові ринки. Завдяки диверсифікації підприємства можуть зменшити ризики, пов'язані з залежністю від одного виду діяльності, і забезпечити стабільний фінансовий потік. Наприклад, будівельні компанії можуть почати пропонувати послуги з проектування, консалтингу або управління будівельними проектами. Це дозволяє їм не лише залучити нових клієнтів, а й підвищити свою конкурентоспроможність на ринку.

Партнерство та кооперація з іншими підприємствами також є важливими стратегічними напрямками. Співпраця з іншими компаніями може забезпечити доступ до нових технологій, ресурсів і знань, що суттєво покращить позиції підрядного підприємства на ринку. Приклади успішних партнерств включають альянси між будівельними компаніями та постачальниками матеріалів або технологічними компаніями. Це дозволяє обом сторонам вигравати від синергії, отримуючи доступ до нових ринків і технологій.

Цільовий реінжиніринг є стратегічним підходом, який фокусується на переосмисленні і перегляді бізнес-процесів у компанії. Цей підхід передбачає не лише удосконалення існуючих процесів, але й їх радикальну зміну з метою досягнення суттєвих поліпшень у продуктивності, якості та вартості. Процес цільового реінжинірингу складається з кількох етапів. Перший етап — це аналіз існуючих бізнес-процесів. Необхідно виявити слабкі місця в управлінні проектами, затримки, надмірні витрати та інші проблеми. На другому етапі розробляються нові концепції для оптимізації процесів. Третій етап передбачає тестування нових підходів у невеликому масштабі, що дозволяє зменшити ризики і оцінити їх ефективність. Нарешті, на четвертому етапі реалізуються зміни у всій організації [2].

Таблиця 1 - Стратегії оновлення будівельних підрядних підприємств

Table 1 – Renewal Strategies of Construction Contracting Enterprises

Стратегія	Опис	Переваги	Приклади застосування
Диверсифікація	Розширення асортименту послуг або вихід на нові ринки для зниження ризиків і стабільності доходів.	- Зниження ризиків, пов'язаних із залежністю від одного виду діяльності - Залучення нових клієнтів	Будівельна компанія додає послуги з консалтингу та управління проектами
Партнерство та кооперація	Співпраця з іншими компаніями для доступу до технологій, ресурсів і нових ринків.	- Отримання доступу до передових технологій та знань - Підвищення ринкової позиції	Альянс між будівельною компанією та постачальником матеріалів для обміну досвідом і знаннями
Цільовий реінжиніринг	Радикальне переосмислення та вдосконалення бізнес-процесів для досягнення істотних поліпшень.	- Скорочення витрат - Підвищення продуктивності та якості - Зростання прибутковості	Аналіз та оптимізація бізнес-процесів, впровадження нових підходів для підвищення ефективності

Джерело: розроблено автором на основі [2]

Source: developed by the author based on [2]

Стратегії оновлення будівельних підрядних підприємств охоплюють диверсифікацію, партнерство та кооперацію, а також цільовий реінжиніринг, представлено в таблиці 1. Диверсифікація передбачає розширення асортименту послуг або освоєння нових ринків, що допомагає знизити ризики і забезпечити стабільний дохід. Партнерство та кооперація сприяють доступу до сучасних технологій і ресурсів завдяки співпраці з іншими компаніями, що покращує позиції на ринку. Цільовий реінжиніринг фокусується на радикальному переосмисленні бізнес-процесів, що дозволяє значно підвищити ефективність і продуктивність компанії, знижуючи витрати та скорочуючи строки виконання робіт. Кожна з цих стратегій сприяє зростанню конкурентоспроможності підприємства через оновлення процесів та адаптацію до ринкових змін.

Реалізація цільового реінжинірингу в будівельних підрядних підприємствах є потужним інструментом для підвищення їхньої ефективності та конкурентоспроможності. Цей підхід спрямований на радикальне переосмислення та оптимізацію бізнес-процесів, що дозволяє компаніям досягати значного зниження витрат, прискорення виконання робіт і покращення якості обслуговування клієнтів [3].

Завдяки цим поліпшенням, підприємства можуть підвищувати рівень задоволеності клієнтів, що безпосередньо впливає на прибутковість і стабільність на ринку. Застосування цільового реінжинірингу в умовах будівельної галузі передбачає повний перегляд та реорганізацію основних процесів, залучених у виробничий цикл, з урахуванням сучасних вимог ринку та специфічних потреб клієнтів [4].

Цільовий реінжиніринг проходить кілька етапів. Перший етап — це глибокий аналіз поточних бізнес-процесів, що включає виявлення «вузьких місць», затримок, надмірних витрат та інших перешкод, які обмежують ефективність роботи компанії. На основі цього аналізу розробляються нові концепції та моделі для оптимізації процесів, що є наступним етапом. Ці концепції включають у себе використання інноваційних підходів до управління проектами, таких як інтеграція сучасних технологій, цифрових інструментів і автоматизованих систем управління. Третій етап передбачає впровадження нових підходів у невеликих масштабах для оцінки їхньої ефективності та зниження ризиків. Останній етап — це масштабне впровадження змін по всій організації, що дає змогу досягти комплексних поліпшень у діяльності підприємства.

Наукова гіпотеза дослідження стверджує, що впровадження цільового реінжинірингу є ефективною стратегією для оновлення бізнес-процесів будівельних підрядних підприємств. Вона заснована на припущенні, що правильне застосування реінжинірингу надає будівельним компаніям значні переваги, включаючи економію коштів, підвищення якості виконання робіт та скорочення строків проєктів, що сприяє поліпшенню задоволеності клієнтів і конкурентоспроможності компанії. Доведення цієї гіпотези ґрунтується на прикладах успішного впровадження реінжинірингу у компаніях, що вже спостерігаються на ринку, де такі компанії отримують доступ до більш широких можливостей, знижують витрати і підвищують ефективність своєї діяльності [5].

Цільовий реінжиніринг пов'язаний із концепцією «парадигми процесів». Існує два основних визначення цієї парадигми: загальне та вузьке. У загальному розумінні парадигма процесів виступає як альтернативний підхід до управління, що протистоїть традиційній функціональній парадигмі класичної теорії організації, де акцент робиться на спеціалізації виконавців. На противагу цьому підходу, парадигма процесів передбачає перехід від жорсткої ієрархії до гнучкіших структур, орієнтованих на ефективність процесів і досягнення стратегічних цілей.

Розвиток парадигми процесів сприяє глибшому розумінню управлінських аспектів і дозволяє підрядним підприємствам краще адаптуватися до швидкозмінного середовища, забезпечуючи більшу швидкість і точність реакції на потреби ринку [6].

У рамках класичної теорії організації ключовими аспектами є ті, що зазначені на рисунку 1.

З іншого боку, парадигма процесів зосереджується на аналізі та оптимізації робочих процесів, що може суттєво змінити підходи до управління організацією. Ця парадигма акцентує увагу на тому, як взаємодіють різні функції в межах організації, і які процеси можуть бути покращені для підвищення загальної ефективності. Це включає в себе:

• Аналіз та мапування процесів: Визначення ключових процесів, які забезпечують виконання завдань організації. Мапування цих процесів допомагає виявити вузькі місця, що перешкоджають ефективності.

• Оптимізація процесів: Після ідентифікації проблемних зон, наступним кроком є розробка та впровадження змін для покращення цих процесів. Це може включати в себе автоматизацію рутинних завдань, спрощення процедур або зміни в управлінській структурі.

• Вимірювання результативності процесів: Важливим аспектом є моніторинг і оцінка ефективності впроваджених змін. Це дозволяє підприємствам адаптуватися до нових умов та постійно вдосконалювати свої процеси.



Рисунок 1 – Ключові аспекти класичної теорії організації реінжинірингу

Джерело: розроблено автором на основі [6]

Figure 1 – Key Aspects of the Classical Theory of Reengineering Organization

Source: developed by the author based on [6]

У той час як функціональна парадигма зосереджується на спеціалізації та структуризації, парадигма процесів акцентує увагу на інтеграції та оптимізації [7]. Цей перехід від одного підходу до іншого є важливим кроком у досягненні сучасних стандартів управління, що враховують швидкі зміни у бізнес-середовищі. Парадигма процесів надає можливість організаціям адаптуватися до динамічного бізнес-середовища, де важливо не лише виконувати завдання, але й постійно вдосконалювати способи їх реалізації. Це робить підприємства більш гнучкими, інноваційними та готовими до викликів, які постійно виникають у сучасному світі.

У класичній американській школі управління питання побудови процесів часто не розглядалися, а під час структуризації організацій акцентувався лише можливий рівень координації між виконавцями при формуванні відділів. Робочі потоки та самі процеси, як правило, не аналізувалися окремо, навіть після розподілу функцій. На відміну від цього, німецька школа управління підходила до цього питання більш комплексно. Наприклад, в одній з робіт автор окремо розглядає структури і процеси під час створення організації. Однак у його моделі процеси залишаються вторинними стосовно структури, тобто конкретні цілі, функції та завдання пов'язані з певним набором дій через структурування [8].

У рамках процесної парадигми організаційні структури формуються за різними підходами, серед яких можна виділити наступні етапи, представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 - Ключові етапи формування організаційних структур за процесною парадигмою
Table 2 - Key Stages in the Formation of Organizational Structures under the Process Paradigm

Етапи процесної парадигми	Опис етапу	Переваги	Недоліки
Визначення основної мети та моделі процесу	Чітке формулювання цілей, що повинні бути досягнуті через реалізацію визначених процесів.	Дає чітке уявлення про цілі та очікувані результати, спрощує планування.	Потребує часу на ретельний аналіз і визначення конкретних цілей.
Визначення варіантів процесу	Розгляд різних способів реалізації процесів для пошуку найефективніших шляхів досягнення мети.	Дозволяє вибрати найбільш оптимальний метод виконання завдань, підвищує адаптивність процесу.	Може бути складним, якщо варіантів багато, вимагає додаткових ресурсів для аналізу.
Ідентифікація блоків або учасників, залучених у виконання процесу.	Визначення ключових блоків або учасників, залучених у виконання процесу.	Сприяє чіткішому розподілу завдань і відповідальності, забезпечує ефективність у використанні ресурсів.	Можуть виникати труднощі у визначенні ключових блоків, особливо у великих компаніях.
Розподіл завдань виконавця	Завдання розподіляються між виконавцями згідно з визначеними блоками процесу.	Підвищує ефективність реалізації цілей, забезпечує оптимальне використання робочої сили.	Може спричинити перевантаження деяких виконавців, якщо розподіл зроблено нерівномірно.

Джерело: розроблено автором на основі [9]

Source: developed by the author based on [9]

Ключова відмінність між класичною та процесною парадигмою в управлінні будівельними підприємствами полягає в тому, що класичний підхід фокусується на структурі організації, тоді як процесний підхід — на оптимізації процесів, що лежать в основі її функціонування. У класичній

парадигмі стратегії зазвичай задають жорстку організаційну структуру: ієрархію управління, чіткий розподіл обов'язків, контроль на кожному рівні. Це дозволяє забезпечити стабільність у виконанні завдань, але водночас обмежує гнучкість та адаптацію до змін [9].

На відміну від класичної моделі, процесна парадигма, яка є основою для реінжинірингу, вважає процеси частиною самої організаційної структури. Це означає, що стратегія і процес формуються одночасно, підтримуючи організацію в досягненні більшої ефективності, оскільки акцент робиться на взаємопов'язаних процесах, що сприяють оптимізації ресурсів та мінімізації витрат. Це є важливим у сучасних будівельних підприємствах, де ефективність та адаптивність є вирішальними факторами успіху, а оптимізація процесів може призвести до зниження вартості проектів та покращення якості обслуговування клієнтів.

У випадку цільового реінжинірингу підхід процесної парадигми дозволяє будівельним підприємствам не тільки адаптуватися до постійних змін на ринку, але й проактивно впливати на їхні бізнес-процеси. Так, реалізація реінжинірингових заходів, таких як оптимізація проектного менеджменту або автоматизація обліку й планування, допомагає уніфікувати та скоротити затрати на ключові етапи проекту. Це дає змогу суттєво підвищити продуктивність, забезпечити виконання будівельних робіт у визначені строки та мінімізувати затримки й додаткові витрати [10].

Процесний підхід також підтримує формування внутрішньої гнучкості організації та її здатності швидко відповідати на виклики ринку. Будівельні підприємства можуть залучати нові технології, модернізувати наявні процеси та здійснювати інтеграцію інновацій, що сприяє зростанню конкурентоспроможності. У результаті, використовуючи стратегії, засновані на процесному підході, підприємство може ефективно управляти витратами, збільшити дохідність проектів та досягати більш високих стандартів якості обслуговування, що підтверджує наукову гіпотезу дослідження: цільовий реінжиніринг є ефективним засобом оновлення будівельних підприємств та підвищення їхньої конкурентоспроможності [11].

У традиційній парадигмі проектування організації акцент робиться на структурних аспектах, що відображаються у формалізації функцій та ролей співробітників. У цій схемі організація розглядається як ієрархічна структура, де кожен рівень має чітко визначені обов'язки та повноваження. Основні елементи такої парадигми представлені на рисунку 2.

Процесна парадигма організації базується на специфічному підході до управління, де керівник, менеджер або співробітник несе відповідальність за забезпечення максимально однорідного виконання конкретного процесу. Попри те, що діяльність цього фахівця охоплює широкий спектр функцій, він спеціалізується на одному виді замовлень або обслуговує певну групу споживачів, що робить його вузьким спеціалістом у своїй сфері. Ця парадигма дозволяє досягати глибшого розуміння потреб клієнтів та забезпечує високу якість виконання завдань [12].

Ще одним важливим фактором, що сприяє популяризації процесної парадигми, є розвиток інформаційних технологій, які розкривають свій потенціал лише у рамках процесного проектування організацій або у випадках, коли організації адаптуються до автоматизації процесів.

Для українських підприємств характерні певні специфічні особливості, які впливають на реалізацію процесної парадигми. В умовах економічної кризи підприємства стикаються з ситуацією «національної» конкуренції, що змушує їх орієнтуватися на ринок. Це призвело до формування нової ідеології виробництва, що включає кілька ключових аспектів. По-перше, діє простий ринковий принцип «немає продажу — немає бізнесу», що означає, що відділ збуту фактично управляє підприємством. По-друге, виробництво більше не розглядається стратегічно; воно сприймається як функціональний підрозділ, призначений для виготовлення товарів, що поступово призводить до деградації виробничого планування [13]. І нарешті, у сфері підвищення якості акцент робиться на процедурах і правилах, які не забезпечують бажаних результатів у вигляді підвищення якості готової продукції. Це свідчить про необхідність зміни підходів до управління якістю та виробництвом у цілому, щоб забезпечити стійкість і конкурентоспроможність українських підприємств на міжнародній арені.



Рисунок 2 – Система парадигми проектування організації

Джерело: розроблено автором на основі [10, 11]

Figure 2 – Organizational Design Paradigm System

Source: developed by the author based on [10, 11]

Концепція управління організаційними процесами розглядає бізнес-процеси як важливий стратегічний ресурс компанії, який динамічно змінюється та адаптується під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів. Кожен бізнес-процес може бути ініційований за певних умов, при цьому створюється конкретний виконавчий екземпляр цього процесу. Опис бізнес-процесу включає в себе діаграму послідовності дій, типи змінних, імена та ролі учасників. Виконавчий екземпляр бізнес-процесу містить контрольні точки на діаграмі, які можуть переміщуватися відповідно до умов виконання завдань і досягнення проміжних результатів [14].

При виконанні бізнес-процесів залучені конкретні виконавці, кожен з яких відповідає за виконання окремих завдань або етапів. Це дозволяє розподілити відповідальність, підвищити

ефективність та забезпечити гнучкість у роботі. Виконавчий рівень бізнес-процесів вимагає детального аналізу, адже саме тут реалізується практична частина управлінського задуму.

Перспектива управління потоком бізнес-процесу представлена діаграмою процесів, яка є структурованим відображенням етапів роботи [15].

Такі діаграми дозволяють створити чітке уявлення про структуру та хід процесу, виявляючи ключові точки для контролю, оптимізації та автоматизації процесів, що в кінцевому результаті підвищує продуктивність і адаптивність бізнес-процесів до змін. На рисунку 3 представлено класичне моделювання бізнес-процесів із використанням процесного підходу.

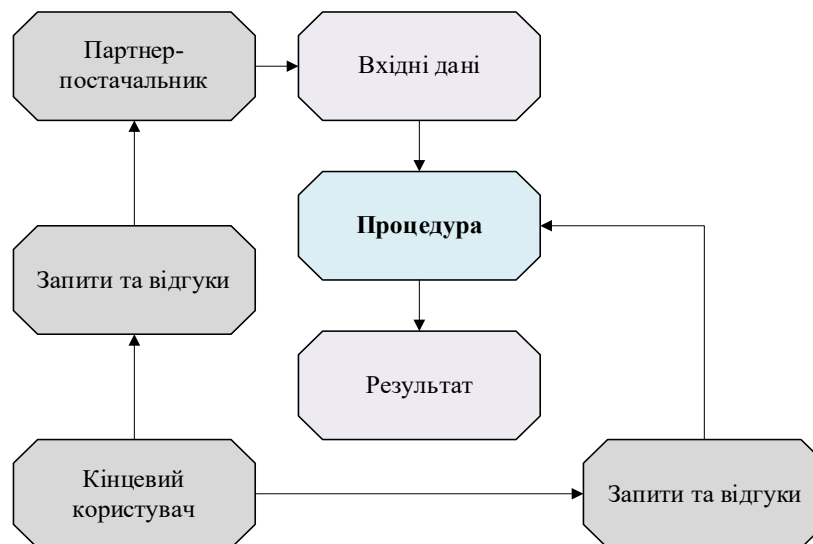


Рисунок 3 – Класичне моделювання бізнес-процесів із використанням процесного підходу

Джерело: розроблено автором на основі [15]

Figure 3 – Classical Business Process Modeling Using the Process Approach

Source: developed by the author based on [15]

За кожним процесом закріплюється відповідальний фахівець, який визначає порядок виконання технічних операцій, необхідні ресурси, вхідні та вихідні дані, а також ключові показники ефективності. На основі отриманої інформації про хід процесу цей фахівець приймає оперативні рішення та оцінює їх результативність. У разі, якщо результати не відповідають встановленим критеріям, розробляються коригувальні заходи для підвищення ефективності [16]. Віце-президент із питань економіки та фінансів здійснює глибокий аналіз витрат, пов'язаних із процесом, та розробляє стратегії оптимізації, щоб мінімізувати витрати без втрати якості виконання. Водночас керівник компанії приймає рішення щодо вдосконалення операційних процесів із фокусом на підвищення гнучкості та адаптивності, що дозволяє оперативно реагувати на зміни вимог кінцевої будівельної продукції та ринкового середовища.

Процесний підхід до управління є ключовою економічною стратегією для будівельних підприємств, що прагнуть підвищити ефективність і конкурентоспроможність шляхом цільового реінжинірингу.

На початковому етапі процесного підходу здійснюється всебічний аналіз наявної системи управління, де виділяють критичні процеси, які вимагають оптимізації. Цей етап включає аналіз структури управління, оцінку існуючих ресурсів та перевірку відповідності бізнес-процесів стратегічним цілям компанії. Завдяки детальному аналізу системи управління підприємство може точніше визначити пріоритети для реінжинірингу та краще адаптуватися до змін у будівельній галузі [17].

Ключовим елементом процесного підходу є розмежування та описання меж і характеристик бізнес-процесів, що дозволяє підприємству бачити точні рамки кожного процесу, а також його функціональні можливості і слабкі місця.

Наукова гіпотеза цього дослідження полягає в тому, що впровадження цільового реінжинірингу в будівельних підрядних підприємствах сприятиме суттєвому підвищенню їхньої ефективності та конкурентоспроможності. Використання процесного підходу до управління, який враховує особливості кожного бізнес-процесу та його внесок у загальну стратегію компанії, дозволить оптимізувати використання ресурсів, скоротити терміни реалізації проєктів і підвищити якість обслуговування клієнтів. Це, своєю чергою, знизить залежність підприємств від зовнішніх факторів та дозволить будівельним підрядним компаніям гнучко реагувати на виклики галузі та економіки загалом [18].

Завдяки реалізації процесного підходу до управління і відповідній модернізації будівельні підприємства можуть закласти міцну основу для досягнення сталого економічного розвитку та зростання конкурентоспроможності на ринку.

Виявлення реальних бізнес-процесів вимагає чіткого розуміння призначення кожного процесу, а також детального знання технологій його реалізації. Ефективно побудована модель організаційних процесів дозволяє компанії визначити зони для потенційного покращення, включаючи автоматизацію операцій, оптимізацію ресурсів, зменшення кількості зайвих кроків та підвищення якості виконання робіт [19]. На рисунку 4 представлено концептуальну структуру керуванням бізнес-процесами.

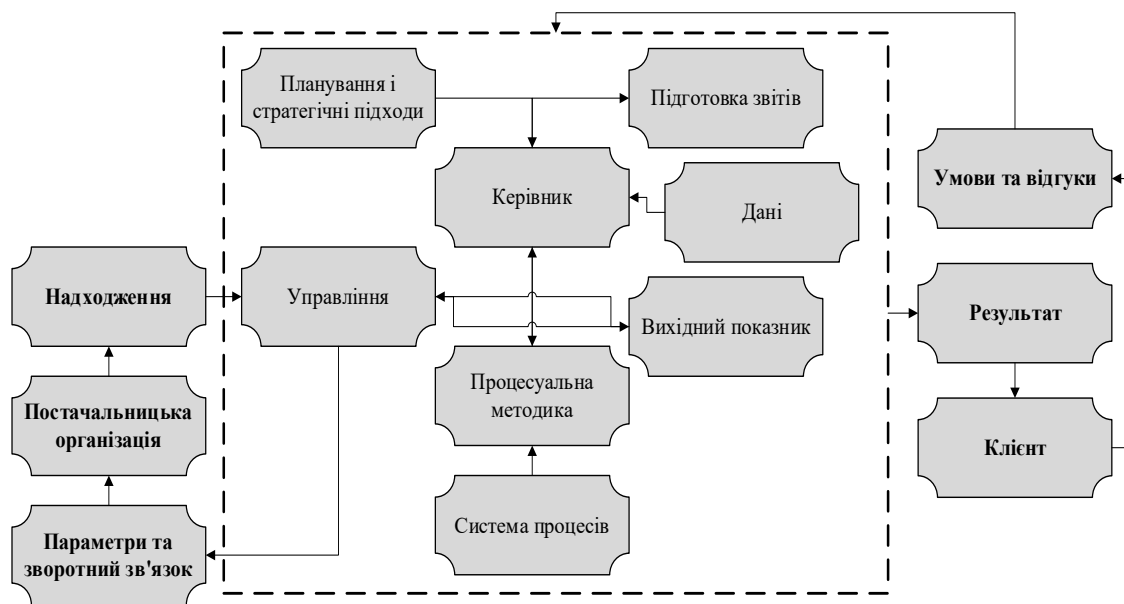


Рисунок 4 – Модель організації процесів в сфері концесії

Джерело: розроблено автором на основі [19]

Figure 4 – Process Organization Model in the Concession Sector

Source: developed by the author based on [19]

Під час аналізу бізнес-процесів акцентується увага на таких ключових характеристиках, як результативність, ефективність та адаптивність. Результативність відображає відповідність результатів бізнес-процесу вимогам замовника, в той час як ефективність вказує на здатність мінімізувати ресурси, які використовуються для досягнення цих результатів. Адаптивність (гнучкість) – це важлива

характеристика, що дозволяє бізнес-процесам оперативно реагувати на зміни в вимогах замовника та зовнішньому середовищі.

Формалізація бізнес-процесів є критично важливою для виявлення напрямків їхнього вдосконалення, що, в свою чергу, сприяє поліпшенню виробничих процесів і загальної діяльності організації. При розробці моделі потрібно не лише ідентифікувати бізнес-процеси, але також виявити взаємодії між ними, встановити чіткі взаємозв'язки, а також отримати інформацію про входи та виходи кожного бізнес-процесу, охоплюючи всі підрозділи організації [20].

Висновки. У процесі проведення дослідження провідних економічних стратегій впровадження заходів оновлення будівельних підрядних підприємств через проєкт цільового реінжинірингу було з'ясовано, що успішна адаптація до сучасних умов ринку є вирішальним чинником для забезпечення конкурентоспроможності та ефективності підприємств у будівельній галузі. На основі отриманих результатів можна стверджувати, що цільовий реінжиніринг не лише оптимізує існуючі бізнес-процеси, а й сприяє формуванню інноваційного середовища в компаніях.

Проведений аналіз показав, що важливими аспектами впровадження реінжинірингових заходів є системний підхід до управління, який забезпечує інтеграцію всіх підрозділів компанії у процеси реінжинірингу, що дозволяє досягти синергії між різними елементами бізнесу. Також велику роль відіграє аналіз потреб і впровадження нових технологій, що включає оновлення технічної бази підприємства, впровадження сучасних цифрових технологій та автоматизацію процесів, які зменшують витрати й підвищують продуктивність. Не менш важливим є фокус на клієнта, оскільки успішні стратегії оновлення включають орієнтацію на потреби та очікування замовників, що дозволяє підвищити рівень обслуговування і задоволення клієнтів.

Окрім цього, постійний моніторинг та адаптація до змін є важливими аспектами, які забезпечують готовність до нових викликів та можливостей. Кадровий потенціал також грає значну роль, адже підвищення кваліфікації працівників, залучення нових спеціалістів і формування команд, здатних реалізувати інноваційні проєкти, є необхідними для успіху.

На основі висновків дослідження можна сформулювати рекомендації для керівництв будівельних підрядних підприємств, які прагнуть реалізувати заходи оновлення через цільовий реінжиніринг. Це включає розробку чіткої стратегії впровадження, що базується на гнучкому плануванні, інвестиціях у нові технології та акценті на управлінні людськими ресурсами. Отже, наукова гіпотеза, що цільовий реінжиніринг є ефективним інструментом оновлення будівельних підрядних підприємств, знайшла підтвердження в результатах проведеного аналізу.

Список посилань

1. Ковальчук О. І. Інноваційні підходи до управління інвестиційними проєктами девелопера. *Економічні науки*. 2018. № 9. С. 129–138.
2. Левченко А. М. Цифрова економіка: нові підходи до інвестиційного управління. Київ : Видавництво НАУ, 2020. 273 с.
3. Луценко Д. О. Управління проєктами в будівельній сфері: цифрові моделі та оптимізація. Київ : Наукова думка, 2019. 190 с.
4. Максименко Л. В. Оптимізація інвестиційних портфелів у будівництві. *Будівельний менеджмент і економіка*. 2017. № 4. С. 81–92.
5. Мельник О. В. Цифрові платформи для управління девелоперськими проєктами. *Управління інвестиціями*. 2021. № 2. С. 54–65.
6. Орлов П. М. Цифрова модель економічного зростання девелопменту. Київ : КНЕУ, 2022. 256с.
7. Пономаренко О. С. Цифровізація управління інвестиційними проєктами. Харків : ХНУРЕ, 2020. 214 с.
8. Романенко В. П. Оптимізація портфеля інвестиційних проєктів: цифровий підхід. *Економічні студії*. 2021. № 3. С. 97–110.
9. Тимошенко Л. В. Цифрові технології в управлінні проєктами: теорія та практика. Київ : Видавничий дім «Київ», 2020. 175 с.

10. Бондаренко О. І. Реінжиніринг бізнес-процесів в будівельних компаніях: основні аспекти. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2022. № 3. С. 45–52.
11. Гончаренко С. М. Інноваційні стратегії в управлінні будівельними проектами. Київ : Наукова думка, 2019. 150 с.
12. Зубенко І. Ю. Підходи до впровадження реінжинірингу в будівельному секторі. *Сучасні проблеми економіки*. 2020. № 5. С. 23–31.
13. Кравченко Т. Л. Стратегії оновлення підприємств через цифровізацію: світовий досвід. *Бізнес Інформ*. 2021. № 8. С. 74–82.
14. Лисенко А. О. Успішні практики реінжинірингу в Україні: можливості та ризики. *Економіка і організація управління*. 2022. № 1. С. 50–58.
15. Піддубна О. О. Інноваційні технології в будівництві: економічні аспекти. Дніпро : ДНУ, 2020. 120 с.
16. Руденко В. І. Стратегії управління змінами в будівельних компаніях. *Науковий вісник*. 2021. № 2. С. 90–97.
17. Соловійов І. П. Впровадження інновацій в управлінні будівельними проектами. *Актуальні проблеми економіки*. 2019. № 4. С. 56–63.
18. Титаренко О. В. Ефективність реінжинірингу в будівельному секторі: методичні аспекти. *Вісник КНУ*. 2021. № 6. С. 115–123.
19. Федоренко В. С. Інвестиційні стратегії у будівництві: теорія та практика. Харків : ХНУ, 2022. 310 с.
20. Яковенко А. І. Управління проектами в умовах динамічних змін: досвід України. *Стратегічні рішення в управлінні*. 2020. № 1. С. 32–40.

LEADING ECONOMIC STRATEGIES FOR IMPLEMENTING RENEWAL MEASURES IN CONSTRUCTION CONTRACTING ENTERPRISES THROUGH A TARGETED REENGINEERING PROJECT. RESEARCH HYPOTHESIS

Aleksieienko Vladyslav O., PhD Student, Department of Management in Construction, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: aleksieienko_vo-2024@knuba.edu.ua, +380683613334, <https://orcid.org/0009-0007-5909-8283>

Abstract. Leading economic strategies for implementing renewal measures in construction contracting enterprises through a targeted reengineering project are considered as an instrument of systemic transformation of industry entities under conditions of increasing market turbulence. Intensified competition, rising costs of material and energy resources, growing complexity of supply chains, digitalization of management processes, and stricter requirements for energy efficiency and environmental responsibility shape a new configuration of economic challenges for construction contractors. Under such conditions, traditional approaches to performance optimization based on partial organizational improvements prove insufficient to ensure long-term financial stability and competitiveness.

Renewal of contracting enterprises is interpreted as a multi-level process of structural, procedural, and financial-economic restructuring aimed at forming an adaptive operational model. This involves a profound transformation of the managerial architecture, including the revision of strategic priorities, optimization of production and supporting processes, reduction of transaction costs, and integration of digital monitoring tools and analytical decision-support systems. Such an approach ensures coherence between operational actions, financial outcomes, and strategic development objectives.

Targeted reengineering is defined as a mechanism for radical redesign of business processes focused on achieving specific economic results—enhanced productivity, stabilization of cash flows, increased profitability, and minimization of project implementation risks. Unlike classical improvement models, targeted reengineering provides synchronization of organizational, technological, and financial changes within a unified strategic transformation program. The research hypothesis is based on the assumption that integration

of organizational, technological, and analytical management tools within a targeted reengineering project generates a synergistic economic effect.

Keywords: Reengineering, economic strategies, construction enterprises, renewal, contracting organizations, project management, innovation, competitiveness.

References

1. Kovalchuk, O. I. (2018) Innovative approaches to investment project management of a developer, *Ekonomichni nauky*, (9), pp. 129–138. [In Ukrainian].
2. Levchenko, A. M. (2020) *Digital economy: new approaches to investment management*. Kyiv: NAU Publishing House. 273 p. [In Ukrainian].
3. Lutsenko, D. O. (2019) *Project management in the construction sphere: digital models and optimization*. Kyiv: Naukova Dumka. 190 p. [In Ukrainian].
4. Maksymenko, L. V. (2017) Optimization of investment portfolios in construction, *Budivelnyi menedzhment i ekonomika*, (4), pp. 81–92. [In Ukrainian].
5. Melnyk, O. V. (2021) Digital platforms for developer project management, *Upravlinnia investytsiiami*, (2), pp. 54–65. [In Ukrainian].
6. Orlov, P. M. (2022) *Digital model of economic growth in development*. Kyiv: KNEU. 256 p. [In Ukrainian].
7. Ponomarenko, O. S. (2020) *Digitalization of investment project management*. Kharkiv: KHNURE. 214 p. [In Ukrainian].
8. Romanenko, V. P. (2021) Portfolio optimization of investment projects: a digital approach, *Ekonomichni studii*, (3), pp. 97–110. [In Ukrainian].
9. Tymoshenko, L. V. (2020) *Digital technologies in project management: theory and practice*. Kyiv: "Kyiv" Publishing House. 175 p. [In Ukrainian].
10. Bondarenko, O. I. (2022) Business process reengineering in construction companies: main aspects, *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti*, (3), pp. 45–52. [In Ukrainian].
11. Honcharenko, S. M. (2019) *Innovative strategies in construction project management*. Kyiv: Naukova Dumka. 150 p. [In Ukrainian].
12. Zubenko, I. Yu. (2020) Approaches to the implementation of reengineering in the construction sector, *Suchasni problemy ekonomiky*, (5), pp. 23–31. [In Ukrainian].
13. Kravchenko, T. L. (2021) Strategies for updating enterprises through digitalization: world experience, *Biznes Inform*, (8), pp. 74–82. [In Ukrainian].
14. Lysenko, A. O. (2022) Successful practices of reengineering in Ukraine: opportunities and risks, *Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia*, (1), pp. 50–58. [In Ukrainian].
15. Piddubna, O. O. (2020) *Innovative technologies in construction: economic aspects*. Dnipro: DNU. 120 p. [In Ukrainian].
16. Rudenko, V. I. (2021) Change management strategies in construction companies, *Naukovyi visnyk*, (2), pp. 90–97. [In Ukrainian].
17. Soloviov, I. P. (2019) Implementation of innovations in construction project management, *Aktualni problemy ekonomiky*, (4), pp. 56–63. [In Ukrainian].
18. Tytarenko, O. V. (2021) Effectiveness of reengineering in the construction sector: methodological aspects, *Visnyk KNU*, (6), pp. 115–123. [In Ukrainian].
19. Fedorenko, V. S. (2022) *Investment strategies in construction: theory and practice*. Kharkiv: KHNU. 310 p. [In Ukrainian].
20. Yakovenko, A. I. (2020) Project management in conditions of dynamic changes: the experience of Ukraine, *Stratehichni rishennia v upravlinni*, (1), pp. 32–40. [In Ukrainian].

Дата надходження до редакції 18.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 05.01.2026.

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-165-183

СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВТЕПЛИХ СУМІШЕЙ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ АСФАЛЬТОБЕТОННОЇ КРИХТИ

CURRENT RESEARCH ON HIGH RAP HALF-WARM MIX ASPHALT



Баран Сергій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: baran_serg@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0002-3591-9880>



Андрієвський Ігор Петрович, аспірант, кафедра дорожньо-будівельних матеріалів і хімії Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: kusto2000@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-0444-5954>

Анотація: У статті наведено сучасні дослідження напівтеплих сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти, що свідчить про перспективність застосування напівтеплих сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти, та дає можливість створювати довговічні і ресурсоефективні матеріали. Використання асфальтобетонної крихти крім економить матеріальні та вирішує питання її утилізації і одночасно дозволяє економити енергетичні ресурси та зменшувати шкідливі викиди у навколишнє середовище за рахунок нижчих технологічних температур приготування та влаштування напівтеплих сумішей. Разом з тим, дана технологія ще недостатньо досліджена, особливо у вітчизняній практиці, та потребує лабораторних та натурних експериментальних досліджень з подальшою оптимізацією рецептурних та технологічних параметрів а також отримання математичних моделей залежностей фізико-механічних характеристик напівтеплих сумішей від складових матеріалу та параметрів технології. Актуальними також є дослідження в лабораторних та польових умовах довгострокових якісних характеристик (розрахункові характеристики, стійкість до утворення колійності та атмосферних впливів) сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти.

Ключові слова: напівтеплі асфальтобетонні суміші з високим вмістом асфальтобетонної крихти, регенероване асфальтове покриття, спінений бітум, стійкість до колії, фізико-механічні характеристики.

Вступ. Важливим завданням дорожньої галузі є зниження витрат, у тому числі на матеріали і компоненти асфальтобетонних сумішей, забезпечуючи при цьому необхідні характеристики матеріалів. Одним із способів вирішення такої задачі є використання напівтепліх асфальтобетонних сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти «High Rap Half-Warm Mix Asphalt» (HWMA) це технічний термін, що використовується для опису асфальтобетонних сумішей, які виробляються на тому ж бітумі що і гарячі, за знижених технологічних температур (80-100 °C) без погіршення фізико-механічних характеристик асфальтобетону [1].

Використання старого, в тому числі фрезерованого асфальтобетону, в Україні регламентується ДСТУ EN 13108-8 [2], де встановлено вимоги до регенованого асфальтобетону, його класифікації та властивостей. ДСТУ EN 13108-8 передбачає повернення старого в тому числі фрезерованого асфальтобетону у якості складової мінеральної частини при виробництві гарячих асфальтобетонних сумішей та у холодному фрезерованому матеріалі може використовуватися з бітумними емульсіями чи цементом для створення холодних сумішей. Такі заходи забезпечують економію за рахунок зменшення потреби у первинних матеріалах та екологічність шляхом зменшення відходів. Разом з тим норматив наголошує на важливості контролювання зернового складу, вмісту бітуму, старого матеріалу, а також підборі в'язучого та інших компонентів для нових сумішей з метою забезпечення їх якості і довговічності.

Окрім ДСТУ EN 13108-8 застосування старого асфальтобетону регламентується ДСТУ-Н Б В.3.2-5 [3]. В даному документі старий асфальтобетон визначений як асфальтогранулят - сипучий матеріал, отриманий шляхом механічного подрібнення асфальтобетонного покриття, відноситься до матеріалів групи VI – суміші з асфальтогранулятом, які передбачено використовувати при виконанні робіт з ліквідації вибоїн покриття на автомобільних дорогах III–V категорій, переважно при температурі повітря від 5 °C до мінус 10 °C та при підвищеній вологості повітря. Також даний ДСТУ-Н Б В.3.2-5 встановлює вимоги до сумішей з асфальтогрануляту

На сьогодні можна спостерігати з одного боку, різке зростання цін на енергоносії та сировину, а з іншого – розвиток будівельної галузі, частиною якої є і асфальтова промисловість [4]. Асфальтова промисловість, зокрема, стикається з дедалі більшими викликами щодо економічної прийнятності та скорочення викидів парникових газів, а також поліпшення умов праці. Одним із можливих рішень виявилися теплі асфальтобетонні суміші (WMA), які можна виробляти та ущільнювати при нижчих температурах порівняно з гарячими асфальтобетонними сумішами (HMA) [4].

У вітчизняній нормативній документації відсутній такий термін як «теплі асфальтобетонні суміші», а застосування подібних матеріалів і технологій регламентується ДСТУ-Н Б В.2.7-315 [5] і поширюється на виробництво та застосування асфальтобетонних сумішей за знижених технологічних температур із використанням енергозберігаючих добавок.

Останнім часом, ще одним кроком у напрямку підвищення екологічності дорожнього покриття стало використання напівтепліх асфальтобетонних сумішей (HWMA), які виробляються при температурі від 70 °C до 100 °C без негативного впливу на їхні кінцеві експлуатаційні характеристики. Серед цих методологічних підходів дуже цікавим рішенням для міських доріг або доріг з невеликим трафіком є суміші HWMA, приготовані з використанням традиційної теплої емульсії та нагрітих агрегатів [6].

За даними [7] застосування WMA, і HWMA зменшують шкідливий вплив на працівників та викиди парникових газів, таких як CO₂ також зменшуються викиди інших хімічних забруднювачів, що сприяє поліпшенню якості повітря. При використанні HWMA досягається скорочення викидів CO₂ на 58% та

зменшення частинок SO_2 на 99,9%. Крім того, також можна досягти скорочення споживання викопного палива. Зокрема, з WMA було повідомлено про економію енергії до 35% [8], а з HWMA скорочення споживання енергії до 50% [7]. Також важливою перевагою цих сумішей є те, що на відміну від асфальту холодного змішування, їх механічні характеристики схожі на HMA [7].

Теплий асфальтобетон (WMA) та регеноване асфальтове покриття (RAP) є найвідомішими стійкими матеріалами в асфальтобетонних покриттях. WMA — це не нова концепція, проте нові інновації та збільшення використання WMA були спричинені посиленою увагою до стійких інфраструктурних систем. WMA дозволяє знизити температуру виробництва за допомогою використання воску, води або інших хімічних добавок. Ефекти зниження температури виробництва включають зменшення споживання палива та викидів, поліпшення ущільнення та можливе збільшення концентрації RAP. RAP — це основний перероблений продукт старих асфальтобетонних покриттів, і його використання призводить до зменшення попиту на первинний заповнювач та асфальт. Щорічно в США виробляється понад 100 мільйонів тонн RAP [9].

Матеріали та методи. Методологічною основою виступає науковий підхід до аналізу питань дослідження шляхом огляду публікацій у відкритих джерелах на досліджувану тему. Джерелами дослідження є публікації у відкритих джерелах.

Метою роботи є огляд сучасних досліджень напівтепліх сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти. На сьогоднішній день застосування таких сумішей є актуальним та перспективним завданням, дає можливість створювати довговічні і ресурсоефективні матеріали, але ще недостатньо досліджений, особливо у вітчизняній практиці. Тому даний аналіз спрямований на вивчення закордонного досвіду та формування подальших напрямків досліджень.

Виклад основного матеріалу.

З метою сприяння циркулярній економіці та використанню більш екологічно чистих технологій у будівельному секторі у роботі [1] досліджувалася продуктивність напівтеплого асфальту (HWMA), виготовленого з високими пропорціями регенованого асфальтового покриття (RAP), а саме поведінка HWMA, виготовленої зі 100% RAP і без омолоджувачів, порівнювалася з поведінкою контрольної суміші, тобто HWMA, виготовленої з 0% RAP. Зокрема, проаналізовано енергію ущільнення за допомогою гіраторного компактора, час змішування та температуру, об'ємні властивості, стійкість до пошкоджень від вологи за допомогою непрямих випробувань на розтягування після занурення (ITS), жорсткість на основі модуля пружності, стійкість до постійної деформації за допомогою тестів відстеження коліс та стійкість до втоми за допомогою непрямих випробувань на втому при розтяг (ITFT). Обидві суміші демонстрували адекватні об'ємні та механічні властивості, але продуктивність HWMA з високим RAP була кращою, ніж у контрольної суміші з точки зору стійкості до постійної деформації в жарких областях.

Автор [1] за результатами роботи звертає увагу на наступне. Під час виробничого процесу необхідно було нагріти бітумну емульсію контрольного HWMA до 80 °C, тоді як для HWMA з високим вмістом RAP бітумнуемульсію нагрівали до 60 °C. Крім того, контрольну суміш ущільнювали за допомогою 150 обертів гіраторного ущільнювача, тоді як для HWMA з високим вмістом RAP використано лише 65 обертів. Це пояснюється бітумом, прикріпленим до заповнювача що зменшує тертя всередині заповнювачів, тим самим сприяючи їхньому ущільненню. Крім того, для контрольної суміші необхідно було додати бітумну емульсію, яка забезпечувала 4,75% залишкового в'язучого; однак для перероблених сумішей необхідно було додати бітумну емульсію яка забезпечувала 1,5% залишкового в'язучого. Таким чином, HWMA з високим вмістом RAP без відновлювачів може бути

виготовлена з використанням меншого вмісту бітуму, меншої енергії на нагрівання та меншої енергії на ущільнення, ніж контрольна HWMA. Така економія енергії та матеріалів може сприяти сталому розвитку. Чутливість сумішей до води була адекватною як у контрольному, так і у випадку HWMA з високим вмістом RAP. Витриманий бітум, що міститься в рециклованій суміші, призвів до того, що високоміцний бітум з високим вмістом рециклованої суміші (HWMA) мав вищу жорсткість, ніж контрольна суміш. Зокрема, HWMA з високим вмістом рециклованої суміші (2,888 МПа) продемонстрував модуль пружності при 20 °C, який був на 45,98% вищим, ніж у контрольній суміші (2,888 МПа для контрольної суміші проти 4,216 МПа для переробленої суміші). Це посилення жорсткості було головним чином відповідальним за кращу стійкість до залишкової деформації суміші HWMA з високим вмістом RAP за будь-яких погодних умов. Фактично, як для помірних, теплих, так і для спекотних зон, суміш, виготовлена зі 100% RAP, підходила б для категорії інтенсивного руху транспорту до T1 ($2000 > AADHT \geq 800$). Натомість контрольна суміш могла впоратися з цими вимогами до руху транспорту лише у випадку теплового та помірного клімату, але не в спекотних районах. Після аналізу опору втомі обох сумішей можна зробити висновок, що для HWMA з високим вмістом RAP без охолоджувачів очікується нижча довговічність до втоми. Більша жорсткість цієї суміші також є основною причиною такої поведінки.

Дослідниками [10] виконано систематичний огляд щодо стійкості до втоми асфальтобетонних сумішей, модифікованих RAP, порівняно з традиційними сумішами за допомогою непрямого випробування на розтяг. Отримані дані дають змогу констатувати, що використання відновленого асфальтового покриття (RAP) в асфальтових сумішах має екологічні та економічні переваги, оскільки зменшує залежність від нових заповнювачів і мінімізує будівельні відходи. Однак старе в'язуче в RAP збільшує жорсткість суміші, що може погіршити її втомну міцність. Цей систематичний огляд оцінює вплив вмісту RAP на втомну міцність у порівнянні з традиційними сумішами, зосередившись на непрямому випробуванні на розтяг (IDT) як основному методі оцінки. Відповідно до параметрів рекомендацій щодо систематичних оглядів та метааналізів (PRISMA), було виявлено п'ять досліджень, опублікованих у період з 2014 по 2024 рік, шляхом пошуку в базах даних Web of Science, ScienceDirect, ASCE та Scopus. Якість досліджень оцінювалася за допомогою інструменту Cochrane Risk of Bias. Результати показують, що, хоча RAP підвищує стійкість до колії, вищий вміст (>30%) часто призводить до зниження втомної міцності через затвердіння в'язучого та зниження гнучкості суміші. Включення омолоджуючих речовин, таких як важкі парафінові екстракти, та модифікаторів, включаючи високомодульні агенти, полімери та епоксидні в'язучі, може частково відновити властивості старого в'язучого та поліпшити характеристики. Сталі інновації, такі як промислові побічні продукти на основі лігніну та технології теплового асфальтобетону, є перспективними для досягнення балансу між механічними характеристиками та зменшенням впливу на навколишнє середовище. Різноманітність джерел матеріалів, стратегій модифікації та протоколів випробувань обмежує пряму порівнянність досліджень, що підкреслює необхідність стандартизованих систем оцінки. Загалом, цей огляд підкреслює, що оптимізація вмісту RAP та вибір ефективних стратегій омолодження або модифікації є необхідними для досягнення довговічних, економічно ефективних та екологічно відповідальних асфальтових покриттів. Майбутні дослідження повинні інтегрувати передові лабораторні методи з проектуванням на основі характеристик, щоб забезпечити високий рівень використання RAP без шкоди для стійкості до втоми.

У статті [11] представлено дослідження з виробництва напівтеплого асфальтобетону (HWMA) з використанням регенованого асфальтового покриття (RAP) та порівняння характеристик HWMA і

гарячого асфальтобетону (НМА) з використанням і без використання RAP. Дослідження має на меті зменшити споживання природних агрегатних ресурсів за допомогою використання матеріалів з пошкодженого покриття. Крім того, в ньому обговорюється екологічний/економічний вплив шляхом мінімізації викидів газів та споживання палива, оскільки HWMА можна виробляти при низьких температурах. Було досліджено три типи сумішей. Першою була традиційна гаряча асфальтова суміш (НМА), названа контрольною сумішшю, виготовлена при температурі 155 °С, а другою була суміш, що містила 70 % RAP та 30 % первинного заповнювача і була підготовлена при температурі 155 °С, названа НМА-RAP. Третя суміш була HWMА, яка містила 70% RAP та 30% первинного заповнювача і була приготована при 90 °С, названа HWMА-RAP. HWMА була приготована з використанням в'язучого, модифікованого етоксильованим нонілфенолом (NP9). Випробувані відсотки NP9 становили 10, 15, 20 і 25% від ваги бітуму. Були проведені експериментальні випробування для оцінки інженерних властивостей сумішей. Всі суміші були розроблені за допомогою методу проектування сумішей Маршалла. Були проведені випробування на стабільність і текучість за Маршаллом, випробування на непряму міцність на розрив (ITS) і випробування на стійкість до колієутворення. Результати показали, що всі суміші досягли меж проектування сумішей Маршалла. Виробництво HWMА-RAP підвищило стабільність за Маршаллом, покращило коефіцієнт Маршалла (MQ) і дещо змінило оптимальний вміст в'язучого (ОАС). Було відмічено значне поліпшення значень ITS для НМА-RAP та HWMА-RAP. Кінцева глибина колії сумішей HWMА-RAP була майже такою ж, як і значення традиційних сумішей. Нарешті, можна зробити висновок, що HWMА-RAP показав такі ж або кращі результати, ніж традиційна суміш. На основі лабораторних випробувань, проведених на трьох різних асфальтових сумішах, можна зробити такі висновки:

- Виробництво НМА-RAP та HWMА-RAP покращило стабільність за Маршаллом. Коефіцієнт Маршалла (MQ) зменшився завдяки підвищенню стабільності та текучості. Це зменшення робить суміш більш стійкою до тріщин.
- Вміст в'язучого дещо змінився як для НМА-RAP, так і для HWMА-RAP.
- Поведінка сумішей HWMА-RAP при випробуваннях на непряму міцність на розрив (тест ITS) була такою ж, як і поведінка контрольних сумішей та сумішей НМА-RAP.
- Суміші HWMА-RAP так само стійкі до колії, як і традиційні суміші.
- Загалом, HWMА-RAP показали таку ж або кращу поведінку, ніж традиційні суміші.

В іншому дослідженні [12] було оцінено об'ємні характеристики суміші та потенціал утворення тріщин у спіненому теплому асфальтобетоні (WMA), що містить різні кількості регенованого асфальтобетону (RAP). Було виявлено, що підвищена здатність до покриття спіненого в'язучого WMA компенсує зниження температури змішування та ущільнення для WMA. Тому як контрольний НМА, так і спінений WMA демонстрували подібні об'ємні характеристики суміші до певних нижчих температур. Однак було виявлено, що подальше зниження температур змішування та ущільнення для спіненого WMA призводить до неналежного змішування між заповнювачами та спіненым в'язучим. Незважаючи на те, що спінений WMA демонстрував подібні об'ємні властивості до НМА до певної нижчої температури, було виявлено, що їхні характеристики стосовно втомного тріщиноутворення значно відрізнялися. Було виявлено, що спінений WMA виявляє вищу стійкість до тріщин порівняно з НМА в тестах на напівкругове згинання Луїзіани (SCB) та тесті на індекс гнучкості Іллінойсу (I-FIT). Було виявлено, що технологія спіненого WMA підвищує стійкість асфальтових сумішей до тріщин. Навпаки, було виявлено, що вищий вміст RAP у спіненому WMA знижує стійкість асфальтових сумішей до тріщин через включення старого і жорсткішого в'язучого з RAP.

Водночас в роботі [13] наголошують, що екологічна безпека асфальтозмішувальних заводів викликає все більшу занепокоєність через високу температуру виробництва асфальтової суміші, що призводить до значного споживання енергії та викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Саме тому багато досліджень у всьому світі зосереджуються на зниженні температури змішування асфальту за допомогою використання теплих, напівтеплих і холодних сумішей. Одним з найуспішніших напрямків досліджень у цій галузі є застосування спіненого бітуму як в'язучого матеріалу для асфальтової суміші, а також важливим екологічним напрямком досліджень є використання RAP (регенерованих асфальтових матеріалів) у нових асфальтових сумішах. Асфальтові суміші з пінобітумом та RAP можуть зменшити цю проблему.

У таблиці 1 наведено загальну кількість та частку застосування матеріалів RAP у деяких європейських країнах у 2019 році [13, 14].

Таблиця 1 – Загальні обсяги та частки застосування матеріалів RAP у деяких європейських країнах у 2019 році [13, 14]

Table 1 – The total quantities and application shares of RAP materials in some European countries in 2019 [13, 14]

Країна	Всі наявні RAP (млн тонн)	% RAP, використаного в		
		гарячому та теплому асфальті	на місці, холодний асфальт	завод, холодний асфальт
Бельгія	1,64	79	0	0
Хорватія	0,21	35	2,5	немає даних
Чеська Республіка	2,80	14	25	0
Фінляндія	1,50	100	0	0
Німеччина	13,40	82	0	0
Угорщина	0,15	98	1	1
Норвегія	1,17	28	0	1
Румунія	0,61	0	5	0
Словаччина	0,16	40	48	0
Словенія	0,15	23	10	0
Іспанія	1,49	0,1	1	6

У цій статті [13] розглядаються їхні функціональні та екологічні ефекти. Використання RAP-матеріалів зменшує шкоду для навколишнього середовища та витрати на будівництво, а також зберігає обмежені ресурси каменю, піску та гравію.

У цій статті було представлено, що гарячі асфальтобетонні суміші, зв'язані спіненим бітумом і містять матеріали RAP, забезпечують хорошу оброблюваність у порівнянні з «традиційними» гарячими асфальтобетонними сумішами. Однак виробництво спіненого бітуму вимагає спеціальних технологічних етапів перед його використанням як асфальтового в'язучого. Тим не менш, використання матеріалів RAP у новій асфальтовій суміші має ряд економічних та екологічних переваг, серед яких: зниження витрат на будівництво; значно менші викиди парникових газів завдяки усуненню значного споживання палива, необхідного для придбання та переробки сировини для «нової» суміші; збереження обмежених ресурсів каменю, піску та гравію; забезпечення якості, що не поступається якості «традиційної» асфальтової суміші. Результати серії лабораторних випробувань доводять, що

додавання матеріалів RAP у зростаючій пропорції збільшує значення стабільності Маршалла (важливий показник прогнозування експлуатаційних характеристик) суміші.

З метою вивчення технології теплового асфальтобетону (WMA) з додаванням регенованого асфальтобетону (RAP) та оцінки взаємодії цих матеріалів на рівні асфальтового в'язучого дослідження були проведені дослідження в роботі [15]. Це обумовлено тим, що у зв'язку з швидким глобальним розширенням дорожніх мереж асфальтова промисловість стикається з низкою екологічних викликів, таких як дефіцит матеріалів, екологічні проблеми, зростання вартості матеріалів, при цьому попит на екологічно чисті матеріали та впровадження політики «нульових викидів». З огляду на ці виклики та визнаючи необхідність пошуку нових рішень, у цьому дослідженні було оцінено зразки асфальтового в'язучого, що містять теплий асфальтобетон (WMA) та регеноване асфальтове покриття (RAP), або WMA-RAP. Оцінка була зосереджена на аналізі фізичних, реологічних та характеристик постійної деформації зразків WMA-RAP, що містять 20%, 35% та 50% переробленого покриття. У дослідженні використовувалася хімічна добавка до WMA типу поверхнево-активної речовини, Evotherm® P25. В'язучі WMA-RAP дозволяють виробляти суміш при нижчих температурах — на 30 °C менше — заощаджуючи енергію та зменшуючи потребу в нових агрегатних матеріалах за рахунок використання перероблених матеріалів, тим самим мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

У порівнянні з еталонними зразками, в ході дослідження оцінювалися зразки WMA-RAP та їх фізичні, реологічні характеристики і характеристики постійної деформації. Результати продемонстрували, що збільшення вмісту RAP значно покращило характеристики зразків, підкресливши потенціал WMA-RAP як стійкої альтернативи для дорожнього покриття.

Основні висновки цього дослідження [15] можна підсумувати наступним чином:

- Взаємодія між новим в'язучим, добавкою WMA та в'язучим RAP не показала негативних результатів у випробуваннях при високих температурах.
- Фізична оцінка показала зниження проникності (від 20% до 47%) та підвищення температури розм'якшення (від 7% до 17%), включаючи 20% до 50% RAP у зразках.
- Видима в'язкість зростала із збільшенням вмісту RAP при 135 °C (від 44% до 181%).
- Однак технологічність усіх зразків WMA-RAP залишалася задовільною, не перевищуючи 3000 сП при 135 °C.
- Зразки з додаванням RAP показали підвищені значення PGH порівняно з еталонними зразками: 1 PGH при 20% RAP і 2 PGH при 35% і 50% RAP. Крім того, безперервний аналіз PGH показав підвищення температури від 4,1 °C до 5,3 °C з кожним збільшенням вмісту RAP у зразках WMA-RAP.
- Основні криві показали збільшення жорсткості матеріалу та зменшення фазового кута, що вказує на старіння при додаванні в'язучого RAP. Однак зразки WMA-RAP продемонстрували зменшену чутливість до старіння в усьому частотному діапазоні порівняно з еталонними зразками, ймовірно, через проведення RTFO при 133 °C.
- Результати MSCR показали, що збільшення вмісту в'язучого RAP покращило стійкість до постійної деформації в зразках WMA-RAP. Значення $J_{nr3.2}$ зменшувалося із збільшенням вмісту RAP, що вказує на здатність витримувати більш інтенсивне дорожнє навантаження для категорій 64S, 64H та 64V/70H відповідно у зразках із 20%, 35% та 50% RAP.
- Зразки WMA з вмістом RAP до 50% продемонстрували задовільні характеристики щодо постійної деформації. Незважаючи на посилене старіння через вищий вміст RAP, вони показали вищі

значення PGH, поліпшені фізичні та реологічні властивості та підвищену продуктивність. Отже, зразки WMA-RAP продемонстрували задовільну поведінку навіть із значним вмістом RAP.

Результати показують, що стійкість до постійної деформації не є перешкодою для використання WMA-RAP. Це дозволяє виробляти суміші при нижчих температурах, зменшуючи споживання енергії, підвищуючи екологічність та використовуючи перероблені матеріали [15].

Економічні вигоди та аспекти сталого розвитку, з урахуванням політики скорочення викидів парникових газів та підвищення середньої глобальної температури, роблять ці типи матеріалів перспективними рішеннями, які будуть широко застосовуватися в найближчі роки. Більше того, це відповідає Цілі сталого розвитку 9 Організації Об'єднаних Націй, яка зосереджена на промисловості, інноваціях та інфраструктурі. Зокрема, це дослідження сприяло розвитку стійкої інфраструктури шляхом створення передових матеріалів та технологій для більш довговічних та стійких критичних споруд. Крім того, воно сприяло впровадженню стійких практик у будівельній галузі та представило інноваційні рішення для інфраструктурних викликів, сприяючи інноваціям у цій галузі. Ці моменти підкреслюють важливість дослідження [15].

У дослідженні [16] оцінювався вплив додавання регенованого асфальтового покриття (RAP) та його вологості на механічні характеристики гарячої асфальтобетонної суміші (НМА). За допомогою стандартного методу Маршалла були підготовлені суміші з 0%, 10%, 20%, 30%, 40% та 50% RAP, і для кожної суміші було визначено оптимальний вміст в'язучого (ОАС). Було досліджено два стани вологості RAP (висушений у печі та насичений поверхнево висушений) для оцінки його чутливості до залишкової вологості. Результати показали, що додавання більшої кількості RAP до суміші знизило ОАС з 5,22% (контроль) до 4,87% (50% RAP), що відображає вплив старого в'язучого. При більш високих рівнях RAP стабільність за Маршаллом підвищувалася, а плінність знижувалася, що означало, що суміш була більш жорсткою. Однак при високих рівнях RAP жорсткість часто перевищувала допустимі межі. Суміші RAP демонстрували зростання значень міцності на розрив до 20% RAP, але при більш високих рівнях ці значення знижувалися. Залишкова вологість в RAP значно впливала на механічні характеристики. Зразки, підготовлені з насиченим RAP, були менш стабільними, мали вищу текучість і значно нижчу непряму міцність на розрив, ніж сухі зразки, що погіршувалося після 20% RAP. До 20% RAP можна використовувати без зниження якості суміші, про що свідчить той факт, що рівні RAP і умови вологості, а також об'ємні (V_a , V_{MA} , V_{FA}) і механічні параметри відповідають стандартам ефективності SCRB R/9 2007 і ASTM. Пропозиції включають управління вологістю RAP шляхом правильного складування, покриття або використання конічних складів [16].

У роботі [9] зазначається що WMA і RAP можуть спричинити проблеми з експлуатаційними характеристиками, зокрема щодо вологості, утворення колій і стійкості до руйнування. Тому ці екологічні матеріали необхідно правильно розуміти і, можливо, використовувати в поєднанні, щоб збалансувати три складові стійкості, як того вимагає стійка система. В дослідженнях [9] було проведено огляд літератури з метою оцінки технологій WMA та їх подальшої ефективності. Крім того, огляд літератури включав розділ про RAP, щоб визначити його вплив на ефективність та фактори, що сприяють успішному використанню RAP. Після цього було проведено випробування асфальтового в'язучого з метою визначення профілів в'язкості-температури модифікованих та немодифікованих асфальтових в'язучих WMA при помірних та високих температурах. Також було проведено оцінку в'язучих при низьких температурах, щоб визначити, як на жорсткість асфальтового в'язучого впливає наявність і концентрація добавок WMA. Нарешті, було розроблено і випробувано суміші з первинного

і RAP WMA та HMA, щоб визначити їхню стійкість до колії, вологи та руйнування. Основні висновки, зроблені в ході цього дослідження [9]:

- Добавки WMA не обов'язково знижують в'язкість асфальтового в'язучого при температурах виробництва у всіх випадках. У двох з трьох випадків у цьому дослідженні в'язкість модифікованого асфальтового в'язучого не відрізнялася істотно від в'язкості немодифікованого в'язучого при всіх температурах випробування.

- Добавки WMA підвищували жорсткість BBR порівняно з немодифікованим асфальтовим в'язучим. Отже, додавання добавок WMA має бути оптимізовано, щоб уникнути потенційних пошкоджень, таких як термічне тріщинне руйнування.

- Стійкість до колії може бути проблематичною для сумішей WMA, що не містять модифікаторів на основі воску. Хімічні та піноутворюючі добавки продемонстрували знижену стійкість до колії в порівнянні з контрольними сумішами HMA та Sasobit WMA (рис. 1).

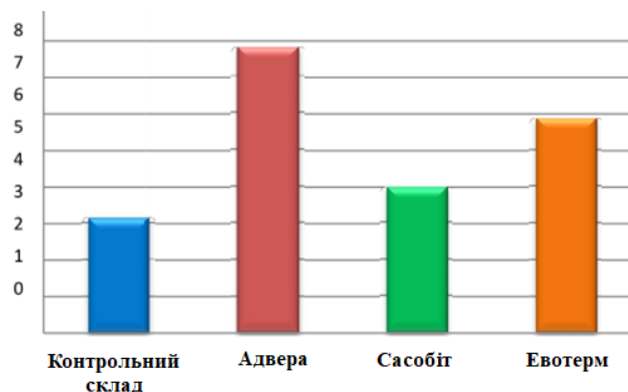


Рисунок 1 – Глибина колії при 45% вмісті RAP після 10 000 проходів коліс [9]

Figure 1 – Track depth at 45% RAP content after 10,000 wheel passes [9]

- Чутливість до вологи є значною проблемою для більшості добавок WMA. Як результат, для вирішення цієї проблеми можуть знадобитися антирозшарувальні агенти або гідратована вапно.

- Стійкість до руйнування значно відрізнялася серед добавок WMA. Тому дані свідчать про те, що зниження температури виробництва не має істотного впливу на енергію руйнування DC(T).

- Нарешті, RAP в деяких випадках може призвести до зменшення колії та чутливості до вологи сумішей WMA, що характеризується відповідно тестами Гамбурга та TSR. Однак для виробництва якісних асфальтобетонних сумішей необхідно враховувати знижену стійкість до руйнування сумішей RAP, оскільки добавки WMA та знижені температури змішування самі по собі не були достатніми для зменшення крихкості сумішей цього дослідження при включенні 45% RAP.

Крім того автор [9] зазначає наступне:

- Зниження в'язкості при температурах виробництва не є основною причиною зниження температур виробництва, доступних у всіх технологіях WMA. Необхідно також враховувати інші фактори, такі як хімічний склад.

- Властивості технологій WMA мають значний вплив на стійкість асфальтобетонних сумішей до руйнування, вологи та колії. Тому для досягнення бажаного результату необхідно вибрати

відповідну технологію, а випробування характеристик є необхідним компонентом при розробці стійких сумішей, що містять WMA та RAP.

- Додавання RAP до WMA може значно поліпшити характеристики цих сумішей при середніх і високих температурах. Однак необхідно ретельно підійти до вибору сорту нового в'язучого матеріалу та типу нового заповнювача, щоб забезпечити належну стійкість до розтріскування.

Автори [17] зазначають що, відсоток RAP, який можна успішно використати при гарячому рециклінгу суміші, визначається переважно практичними міркуваннями. Щоб уникнути погіршення стану старого в'язучого, RAP не слід піддавати дії відносно високих температур. У цьому дослідженні вивчалася можливість використання добавки для теплої асфальтової суміші (WMA) - Sasobit H8 – для успішного рециклінгу гарячої асфальтової суміші з 75% вмісту RAP при нижчій температурі.. Контрольна зразок гарячої асфальтової суміші був приготований з екстрагованими заповнювачами та в'язучим PG 64-28 при температурі 150 °C. Ще один зразок гарячої асфальтової суміші був виготовлений з в'язучим PG 52-28 при температурі 135 °C. Дві суміші WMA було приготовано з Sasobit H8 при 125 °C, одна з в'язучим PG 52-28, а інша з PG 42-42. Зразки з проектним вмістом асфальту ущільнювалися за допомогою 75 обертів гіраторного ущільнювача Superpave. Визначалися та порівнювалися їх пори, міцність на розрив при -10 °C, опір колієутворенню при 60 °C та модулі при 0, 25 та 40 °C (у різний час). Зразки для визначення модулів піддавалися впливу температури 60 °C між тестами. Результати показують, що можливо виробляти суміші з 75% RAP з аналогічними порами, як у сумішей з первинних матеріалів, при нижчих, ніж традиційні, температурах з використанням 1,5% Sasobit. Додавання значно м'якшого в'язучого, PG 42-42, у кількості 1,5% від маси суміші, призвело до отримання суміші, найбільш подібної до суміші з первинних матеріалів.

У результаті виконаних досліджень у роботі [17] наведено наступні висновки:

- Можна виготовляти суміші з 75% RAP з подібним вмістом повітряних пустот, як у первинних сумішах за нижчих, ніж звичайні, температур, використовуючи 1,5% Sasobit (від ваги загальної асфальтової зв'язувальної речовини).
- Додавання Sasobit допомагає знизити в'язкість асфальтової зв'язувальної речовини за вищих температур, але, найімовірніше, має незначний ефект твердіння за низьких температур.
- Додавання Sasobit допомогло отримати однорідні суміші, що видно з низької мінливості властивостей.
- Додавання значно нижчого сорту зв'язуючої речовини, PG 42-42, у кількості 1,5% від ваги суміші, дало суміш, яка найбільше порівнянна з первинною сумішшю.
- Додавання Sasobit H8 допомогло отримати повітряні пустоти в сумішах, ущільнених за нижчої, ніж звичайна, температури, які були подібні до повітряних пустот, отриманих у звичайних сумішах, ущільнених за звичайних температур.

У роботі [18] проведена оцінка експлуатаційних характеристик теплих асфальтобетонних сумішей з переробленим асфальтовим покриттям. Зазначено що, технологія теплового асфальтобетону (WMA) забезпечує не тільки виробництво асфальтового покриття за нижчої температури, ніж температура, що підтримується в гарячій асфальтовій суміші (HMA), але й заохочує використання переробленого асфальтового покриття (RAP), і таким чином економить енергію та невідновлювані ресурси, а також зменшує викиди та споживання палива. Описано доцільність використання чотирьох різних добавок WMA (органічних, хімічних, синтетичних цеолітів та природних цеолітів) з різним вмістом RAP. Після визначення оптимального вмісту RAP, що відповідає кожній добавці WMA, було проаналізовано аналіз Маршалла, модуль непрямої жорсткості на розтяг та поведінку втоми HMA та

WMA, що включає RAP, та порівняно їх з контрольними зразками. Для оцінки характеристик залишкової деформації сумішей, що містять оптимальний вміст RAP використовували гамбурзький метод для визначення колієстійкості.

Висновки дослідників [18] вказують наступне. Зниження викидів від виробництва асфальту на заводі та викидів від ущільнення в польових умовах є найважливішими перевагами використання WMA. Властивості бітуму покращуються за допомогою органічних, хімічних, синтетичних цеолітних добавок WMA та природного цеоліту. Цих результатів було досягнуто завдяки традиційним методам випробувань, такі як проникнення, температура розм'якшення, обертальна в'язкість, результати випробувань TFOT. Крім того, використання органічних, хімічних, синтетичних цеолітів та природних цеолітних добавок допомагає знизити значення в'язкості, що, у свою чергу, знижує температуру змішування та ущільнення, що призводить до зменшення витрат енергії, а також викидів. Значення стабільності за Маршаллом, пов'язані з сумішами RAP, виявилися вищими, ніж у контрольних сумішах. Виходячи з використаного заповнювача, 20%, 30%, 10% та 20% можна прийняти як оптимальний вміст RAP для зразків НМА, органічних, хімічних, як синтетичних цеолітів, так і природних цеолітових добавок відповідно.

Інші властивості зразків, включаючи оптимальний вміст RAP для сумішей НМА та кожної добавки WMA, також знаходяться в межах специфікацій щодо плинності, рівня повітряних порожнин. Використання добавок WMA значно покращує характеристики втоми бітумних сумішей. Однак, використання матеріалів RAP негативно впливає на характеристики втоми. Враховуючи вплив RAP на характеристики втоми, можна сказати, що навіть якщо характеристики Маршалла сумішей, що містять матеріали RAP, залишаються в допустимих межах, характеристики втоми цих сумішей необхідно враховувати окремо. Серед добавок, що використовуються в рамках дослідження, органічна добавка WMA є придатною добавкою, яку можна використовувати як омолоджуючий агент під час відновлення доріг з використанням матеріалів RAP. Деформація зразків з усіма добавками WMA, що контролювалася під час випробування на непряму втому при розтягу, показує, що добавки значно збільшують кількість циклів навантаження зразків для контрольної деформації порівняно зі сумішами НМА. Крім того, додавання RAP значно покращує деформаційні характеристики зразків WMA. Варіація є набагато перспективнішою з органічною добавкою WMA [18].

У світлі результатів випробувань на утворення колії, можна вважати, що добавки WMA, що використовуються в рамках цього дослідження, покращують характеристики стійкості до утворення колії в бітумних сумішах. Органічні та хімічні добавки мають структурно-модифікуючий вплив на бітумні суміші, оскільки цеоліти також поведуться як частинки наповнювача. Для певної кількості проходів (наприклад, 15 000 проходів) суміші з органічною добавкою демонструють найнижчий відсоток глибини колії. Цей результат пояснюється кристалізованою структурою, що виникає внаслідок модифікуючого ефекту органічної добавки WMA. Загалом, суміші WMA, приготовані з добавками, що використовуються в цьому дослідженні, мають кращі характеристики, ніж суміші НМА, з точки зору втоми та колійності. Окрім модифікаційного впливу добавок WMA, менший ступінь старіння через нижчі температури застосування відіграє важливу роль у загальній оцінці цих інноваційних технологій [18].

У роботі [19] надано оцінку механічних характеристик напівтепліх перероблених асфальтових сумішей, що містять до 100% RAP. В статті продемонстровано доцільність використання оцінки механічних характеристик напівтепліх перероблених асфальтових сумішей, що містять до 100% RAP у шарах зносу. Для цього в лабораторії було розроблено HWMRA з 70% та 100% відновленим

асфальтовим покриттям (RAP) та емульсією. Потім характеристики сумішей були оцінені та порівняні з характеристиками звичайного гарячого асфальтового покриття. На другому етапі суміші були виготовлені на заводі, укладені та ущільнені на прискореній випробувальній трасі для дорожнього покриття. Потім були вилучені керни та випробувані на модуль жорсткості та стійкість до втоми. Результати випробувань, проведених як з лабораторними зразками, так і з кернами, показали, що характеристики HWMRA порівнянні з характеристиками НМА. Ці результати вселяють більшу впевненість у просуванні використання цих типів екологічно чистих асфальтових сумішей. Для цього суміші HWMRA досліджувалися у два етапи. На першому етапі досліджували лабораторні зразки, а на другому етапі суміші випробували на етапах виробництва на заводі, укладання та ущільнення в польових умовах. Результати завжди порівнювали з результатами, отриманими за допомогою звичайного НМА.

Після лабораторного виробництва суміші були випробувані на модуль жорсткості, водочутливість та стійкість до залишкових деформацій. Можна зробити такі висновки [19]:

- Через різні значення, отримані стосовно модуля жорсткості (що може бути пов'язано з різними методами ущільнення), неможливо зробити якісь остаточні висновки щодо жорсткості HWMRA та НМА.

- ***Водочутливість HWMRA відповідає вимогам для використання в шарах зносу.***

- HWMRA демонструє достатні показники утворення колії.

Прототип установки був здатний виробляти суміші, що містять до 100% RAP, використовуючи емульсію за напівтеплих температур. Після укладання та ущільнення в польових умовах керни були вилучені, а їх модуль жорсткості та опір втоми були оцінені в лабораторії. Можна зробити такі висновки:

- Модуль жорсткості HWMRA був вищим, ніж у НМА, і подібним до результатів, отриманих для лабораторного виробництва. Більше того, щільність кернів також була порівнянною з лабораторними зразками. Таким чином, схоже, що HWMRA можна успішно відтворити на заводі та ущільнити без жодних проблем.

- Для випробуваних рівнів напруження характеристики втоми HWMRA були задовільними порівняно з НМА.

Таким чином, HWMRA продемонстрував еквівалентну ефективність НМА, що підтверджується як лабораторними, так і польовими випробуваннями. Таким чином, HWMRA, виготовлений з емульсій, можна розглядати як екологічно безпечну альтернативу НМА.

У роботі [20] виконане лабораторне дослідження ущільнення та оцінка механічних характеристик напівтеплих асфальтобетонних сумішей з переробленого асфальту, що містять 100% RAP. Зазначено, що ще залишаються деякі технічні прогалини щодо процедур проектування сумішей для приготування та характеристики напівтеплих асфальтобетонних сумішей (HWMRA) у лабораторії. З цією метою було обрано три різні методи лабораторного ущільнення (наприклад, статичне навантаження, ударний ущільнювач Маршалла та гірометричний ущільнювач) та проведено оцінку, щоб визначити найбільш підходящий метод випробувань на ущільнення напівтеплих сумішей переробленого асфальту (HWMRA) зі 100% регенованим асфальтовим покриттям (RAP). Згодом було досліджено вплив чотирьох режимів прискореного твердіння (0, 24, 48 та 72 год) на механічні характеристики сумішей. Потім було проведено розширену механічну характеристику характеристик суміші для кількісної оцінки непрямої міцності на розтяг (ITS), модуля жорсткості, утворення колії та випробування на втоми при чотириточковому згинанні (4PB). Таким чином, згідно з висновками

авторів, суміші HWMRA зі 100% RAP та емульгованим бітумом продемонстрували належну об'ємну (наприклад, повітряні порожнини та щільність) та механічну поведінку з точки зору пошкодження вологою, внутрішньої пружності (ITS), модуля жорсткості, утворення колії та розтріскування від втоми. Ці результати вселяють більшу впевненість у просуванні використання цих екологічно чистих асфальтових сумішей для їх використання на дорожніх покриттях або міських вулицях.

Основною метою дослідження [20] було оцінити три різні процедури лабораторних випробувань на ущільнення (тобто ударний ущільнювач Маршалла, статичне навантаження подвійним плунжером та гіраторний ущільнювач) та визначити найбільш підходящий метод для напівтепліх сумішей переробленого асфальту, що містять 100% вміст RAP, та емульгований бітум. Другою метою було кількісно визначити вплив прискореного твердіння на розвиток механічних властивостей сумішей. В результаті проведених випробувань можна зробити наступні висновки [20], що стосуються ущільнення та характеристики зразків HWMRA на стадії проектування суміші:

- Розглядаючи об'ємні та механічні властивості, отримані за допомогою трьох різних методів лабораторного ущільнення, можна сказати, що система гіраторного ущільнювача виявилася найбільш підходящим методом випробувань на ущільнення для виробництва/ущільнення та характеристики зразків напівтеплої суміші переробленого асфальту (HWMRA) в лабораторії. Для цього зразки ущільнювали, застосовуючи розрахункову енергію ущільнення суміші 70 гіроскопів при температурі 80 °C, та встановлення гіраторного ущільнювача під внутрішнім кутом обертання 0,82°, вертикальний тиск ущільнення 600 кПа та швидкість обертання 30 об/хв.

- Варто зазначити, що використання статичного стискаючого навантаження подвійним плунжером навантаженням 21 МПа було відхилено для подальших механічних випробувань, оскільки цей метод продемонстрував значно вищі значення об'ємної щільності, непрямої міцності на розтяг та модуля жорсткості, ніж ті, що отримані за допомогою дорожніх випробувань робочий майданчик після будівництва дорожнього покриття. Крім того, було помічено, що статичний метод спричиняв руйнування заповнювачів та стискання в'язучих речовин протягом усього процесу ущільнення суміші.

- Щодо результатів ущільнення сумішей за допомогою ударного ущільнювача Маршалла з 75 та 100 ударами з кожного боку, було отримано значне погіршення об'ємних (повітряні порожнини та об'ємна щільність) та механічних характеристик (модуль жорсткості та ITS) сумішей у порівнянні з результатами, отриманими за допомогою гіроскопічного ущільнювача при 70 обертах; ймовірно, в результаті руйнування заповнювачів під час процесу ущільнення суміші.

- Ефект тривалої прискореної обробки твердінням протягом трьох днів (72 год) при температурі 50°C, було виявлено досить позитивний вплив на розвиток механічних властивостей сумішей з точки зору модуля жорсткості та непрямої міцності на розтяг.

- Суміш HWMRA 100% RAP відповідає значенням стійкості до пошкодження вологою та утворення колії, встановленим іспанськими технічними специфікаціями для перероблених сумішей з емульсією для їх використання в дорожніх покриттях середньої або низької категорії транспортного навантаження. Крім того, було встановлено, що ця суміш відповідає вимогам, встановленим для гарячих асфальтобетонних сумішей для цих типів шарів (асфальтові суміші для основного шару) та термічних умов.

- Для тих самих рівнів деформації, що були протестовані, можна сказати, що суміші HWMRA з бітумом марки 50/70 реп. показали прийнятні характеристики з точки зору довговічності. Однак, бітум 50/70 реп. продемонстрував дещо нижчу мікророзтягову втому-деформацію (ϵ_b) значення, ніж результати для бітуму марки 160/220 реп. Це, ймовірно, пояснюється впливом м'якшого бітуму з

проникненням у кінцеву конструкцію суміші, що дозволило забезпечити вищу пластичність та гнучкість суміші, забезпечуючи більші навантаження від втоми при розтягуванні та деформації.

Однак не зважаючи на велику кількість проведених досліджень напівтепліх сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти дослідники рекомендують провести подальші дослідження, щоб розширити висновки в наступних областях.

Для більш повного розуміння взаємодії матеріалів необхідний хімічний аналіз. Крім того, для підтвердження результатів майбутніх досліджень слід розглянути можливість оцінки стійкості до втоми, чутливості до води та випробування інших в'язучих речовин RAP [15].

За результатами дослідження автори [16] додатково рекомендують дослідити біоосновані або відпрацьовані масла, які можуть відновити властивості старих в'язучих речовин, дозволяючи вмісту RAP перевищувати 20% при збереженні жорсткості та мінімізації ризику утворення тріщин. Також бажано здійснити оцінку додавання полімерів до асфальтових в'язучих речовин, які можуть зміцнити НМА, підвищити еластичність і поліпшити вологостійкість та додатково провести випробування на колісному сліді (AASHTO T 324) та випробування на втомну міцність (AASHTO T 321) сумішей з високим вмістом RAP, щоб оцінити їх стійкість до колії та втоми протягом тривалого періоду.

Майбутні дослідження повинні інтегрувати передові лабораторні методи з проектуванням на основі характеристик, щоб забезпечити високий рівень використання RAP без шкоди для стійкості до втоми [10].

Продовження зазначених досліджень буде зосереджено на розробці математичної моделі оптимізації експлуатаційних характеристик для з'ясування взаємозв'язку між змінними процесу спінювання бітуму [13].

Вивчення характеристик сумішей WMA з низьким і помірним вмістом RAP. Це дослідження може надати практикам і дослідникам діапазон відсоткового вмісту RAP, який забезпечує оптимальні характеристики з точки зору стійкості до колії, вологості та руйнування. Застосування моделі прогнозування експлуатаційних характеристик для вивчення довгострокових експлуатаційних характеристик сумішей RAP WMA. Це дослідження може надати практикам уявлення про експлуатаційні характеристики сумішей RAP WMA, що виходять за межі доступних на сьогоднішній день експлуатаційних характеристик. Розробка специфікації експлуатаційних характеристик сумішей WMA. Велика кількість технологій вимагає використання специфікації експлуатаційних характеристик для зменшення потенційного неправильного використання WMA [9].

Автори [1] зазначають, що під час аналізу на втому спостерігався сильний розкид результатів, тому було б доцільно додатково дослідити цю властивість у майбутніх дослідженнях.

Дослідники [17] пропонують провести дослідження довготривалої міцності та стійкості до втоми.

Також авторами роботи [20] наголошується на продовженні роботи з моніторингу стану та характеристик механічних властивостей сумішей HWMRA зі 100% RAP та емульгованим бітумом, як у лабораторії, так і в польових умовах, щоб заохотити більшу впевненість у просуванні використання цих сумішей для робіт з технічного обслуговування та реконструкції (M&R) дорожніх покриттів

Висновки. Загалом, дослідження напівтепліх сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти є актуальною задачею сьогодення для багатьох країн в тому числі і України. Використання вищевказаних сумішей має ряд переваг і широко впроваджується у світі.

Однією з переваг сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти є використання переробленого асфальтового покриття (RAP), і таким чином економить енергію та невідновлювані ресурси. За даними дослідників Щорічно в США виробляється понад 100 мільйонів тонн RAP, а у Європі станом на 2019 рік - більше 23 мільйонів тонн.

Іншою суттєвою перевагою є особливості технології які дозволяють виготовляти такі суміші при нижчих температурах що в свою чергу значно зменшуються викиди хімічних забруднювачів: скорочення викидів CO₂ на 58% та зменшення частинок SO₂ на 99,9% у порівнянні з гарячими сумішами, разом з тим зменшується споживання енергії на 35 - 50%.

По свої характеристикам суміші з високим вмістом асфальтобетонної крихти в залежності від вмісту RAP та особливостей технології демонструють адекватні об'ємні та механічні властивості, HWMA з високим вмістом RAP продемонстрував модуль пружності при 20 °C, який був на 45,98% вищим, ніж у контрольної суміші, водночас в HWMA з високим вмістом RAP очікується нижча довговічність до втоми що пояснюється більшою жорсткістю цієї суміші. Разом з тим суміші HWMA-RAP так само стійкі до колії, як і традиційні суміші. Дослідники рекомендують застосовувати суміші HWMA-RAP при середній та низькій інтенсивності руху в умовах помірного та жаркого клімату.

На сьогодні існує відносно невелика кількість досліджень напівтепліх сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти, особливо вітчизняних оскільки лише в небагатьох дослідженнях вивчаються розрахункові та експлуатаційні характеристики напівтепліх сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти.

На даному етапі доцільно проводити лабораторні та натурні експериментальні дослідження впливу кількості та якості асфальтобетонної крихти на фізико-механічні властивості напівтепліх сумішей, їх оптимізація при використанні найбільш поширених і типових матеріалів в Україні з метою визначення параметрів технології улаштування напівтепліх асфальтобетонних сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти та отримання математичних моделей залежностей фізико-механічних характеристик напівтепліх сумішей від складових матеріалу та параметрів технології. Також є актуальними дослідження в лабораторних та польових умовах довгострокових якісних характеристик (стійкість до утворення колійності та атмосферних впливів) сумішей з високим вмістом асфальтобетонної крихти. Реалізація всіх вищезазначених заходів надасть змогу економити енергетичні та матеріальні ресурси, зменшити шкідливі викиди у навколишнє середовище, а також створення довговічних і ресурсоефективних матеріалів, що особливо актуально в умовах післявоєнної відбудови.

Перелік посилань

1. Pasandín A.R., Pérez, I., Gómez-Meijide B. Performance of High Rap Half-Warm Mix Asphalt. *Sustainability*. 2020. 12(24). 10240. <https://doi.org/10.3390/su122410240>
2. ДСТУ EN 13108-8 Асфальтобетон. Вимоги до матеріалів. Частина 8: Регенований асфальтобетон (EN 13108-8:2016, IDT). [Чинний від 2019-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 10 с.
3. ДСТУ-Н Б В.3.2-5:2016 Настанова з ліквідації вибоїн покриття нежорсткого дорожнього одягу автомобільних доріг. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство України, 2017. 21 с.
4. Pavšič, Primož. Warm mix asphalt use in Slovenia and in Europe: A review. *Gradjevinski materijali i konstrukcije*. 2022. Vol. 65. P. 149-153. <https://doi.org/10.5937/GRMK2204149P>

5. ДСТУ-Н Б В.2.7-315:2016 Настанова щодо виробництва та застосування асфальтобетонних сумішей за знижених технологічних температур із використанням енергозберігаючих добавок. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2017. 14 с.
6. Federico Autelitano, Erika Garilli, Felice Giuliani. Half-warm mix asphalt with emulsion. An experimental study on workability and mechanical performances, *Transportation Research Procedia*, 2021. Vol. 55. P. 1081-1089. ISSN 2352-1465. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.079>
7. Rubio M.D.C., Moreno F., Martínez-Echevarría M.J., Martínez G., Vázquez J.M. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *J. Clean. Prod.* 2013. Vol. 41, P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.036>
8. Capitão S., Picado-Santos L., Martinho F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2012. Vol. 36. P. 1016-1024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>
9. Hill B. Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures incorporating reclaimed asphalt pavement. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA, 2011.
10. Loprencipe G, Moretti L, Saltaren Daniel M. Fatigue Resistance of RAP-Modified Asphalt Mixes Versus Conventional Mixes Using the Indirect Tensile Test. *A Systematic Review. Designs.* 2025. Vol. 9(5):104. <https://doi.org/10.3390/designs9050104>
11. Afshar Yousefi, Ali Behnood, Ata Nowruzi, Hamzeh Haghshenas, Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials.* 2021. Vol. 268. 121200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121200>
12. Mohammad Ashiqur Rahman, Musharraf Zaman, Syed Ashik Ali, Rouzbeh Ghabchi & Sagar Ghos. Evaluation of mix design volumetrics and cracking potential of foamed Warm Mix Asphalt (WMA) containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *International Journal of Pavement Engineering.* 2021. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1902522>
13. Saleh, A., & Gáspár, L. Functional and environmental impacts of the use of reclaimed asphalt pavement materials and of foamed asphalt. *Acta Technica Jaurinensis.* 2021. Vol. 14(2). P. 212–227. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00590>
14. D. B. Sánchez, G. Airey et al., Effect of foaming technique and mixing temperature on the rheological characteristics of fine RAP-foamed bitumen mixtures. *Road Materials and Pavement Design.* 2020. Vol. 21 (8). P. 2143-2159. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593228?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
15. Bohn KA, Thives LP, Specht LP. Physical, Rheological, and Permanent Deformation Behaviors of WMA-RAP Asphalt Binders. *Sustainability.* 2023. Vol. 15(18):13737. <https://doi.org/10.3390/su151813737>
16. Mohammad Naser, Mu tasim Abdel-Jaber, Rawan Al-shamayleh, Nawal Louzi, Reem Ibrahim. Evaluating the effects of using reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate on the behavior of hot mix asphalts. *Transportation Engineering,* 2022. Vol. 10. 100140. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100140>
17. Mallick R.B., Kandhal P.S., Bradbury R.L. Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp.*

Res. Board. 2008. Vol. 2051. P. 71-79. https://doi.org/10.3141/2051-09?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

18. Sengoz B., Topal A., Oner J., Yilmaz M., Dokandari, P.A., Kok B.V. Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Pavement. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 2016, Vol. 61, P. 117–127. <https://doi.org/10.3311/PPci.8498>

19. Lizárraga J.M., Del Barco-Carrión A.J., Ramírez A., Díaz, P., Moreno-Navarro F., Rubio M.C., Rubio-Gámez M. Mechanical performance assessment of half warm recycled asphalt mixes containing up to 100% RAP. *Mater. Construc.* 2017. Vol. 7, 129. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.05116>

20. Marcobal J.R., Lizárraga J.M., Gallego J. Laboratory Compaction Study and Mechanical Performance Assessment of Half-Warm Mix Recycled Asphalt Mixtures Containing 100% RAP. *Materials*. 2019. 12.

https://doi.org/10.3390/ma12121992?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

CURRENT RESEARCH ON HIGH RAP HALF-WARM MIX ASPHALT

Baran Serhii A., Ph.D. (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of Road Building Materials and Chemistry, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: baran_serg@ukr.net, tel. +380442859528, <https://orcid.org/0000-0002-3591-9880>

Andriievskiy Ihor P., Postgraduate student of Road Building Materials and Chemistry, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kusto2000@gmail.com, tel. +380442859528, <https://orcid.org/0009-0007-0444-5954>.

Summary. The article presents recent studies of high rap half-warm mix asphalt, which indicates the promising application of semi-warm mixtures with a high content of asphalt concrete crumbs and makes it possible to create durable and resource-efficient materials. The use of asphalt concrete crumbs not only saves materials and solves the issue of its disposal, but also allows saving energy resources and reducing harmful emissions into the environment due to lower technological temperatures for the preparation and installation of semi-warm mixtures. At the same time, this technology has not yet been sufficiently researched, especially in domestic practice, and requires laboratory and field experimental studies with subsequent optimization of formulation and technological parameters, as well as the development of mathematical models of the dependence of the physical and mechanical characteristics of semi-warm mixtures on the components of the material and technological parameters. Research in laboratory and field conditions on the long-term quality characteristics (calculated characteristics, resistance to rutting and atmospheric influences) of mixtures with a high content of asphalt concrete crumbs is also relevant.

Keywords: semi-warm asphalt concrete mixtures with a high content of asphalt concrete crumbs, reclaimed asphalt pavement, foamed bitumen, rutting resistance, physical and mechanical characteristics.

References

1. Pasandín A.R., Pérez, I., Gómez-Meijide B. Performance of High Rap Half-Warm Mix Asphalt. *Sustainability*. 2020. 12(24). 10240. <https://doi.org/10.3390/su122410240>

2. DSTU EN 13108-8 Asfaltobeton. Vymohy do materialiv. Chastyna 8: Rehenerovanyi asfaltobeton (EN 13108-8:2016, IDT). [Chynnyi vid 2019-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2019. 10 s. [in Ukrainian]

3. DSTU-N B V.3.2-5:2016 Nastanova z likvidatsii vyboin pokryttia nezhorstkoho dorozhnoho odiahu avtomobilnykh dorih. [Chynnyi vid 2017-04-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2017. 21 s. [in Ukrainian]
4. Pavšič, Primož. Warm mix asphalt use in Slovenia and in Europe: A review. *Gradjevinski materijali i konstrukcije*. 2022. Vol. 65. P. 149-153. <https://doi.org/10.5937/GRMK2204149P>
5. DSTU-N B V.2.7-315:2016 Nastanova shchodo vyrobnytstva ta zastosuvannia asfaltobetonnykh sumishei za znyzhenykh tekhnolohichnykh temperatur iz vykorystanniam enerhozberihaiuchykh dobavok. [Chynnyi vid 2017-04-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2017. 14 s.
6. Federico Autelitano, Erika Garilli, Felice Giuliani. Half-warm mix asphalt with emulsion. An experimental study on workability and mechanical performances, *Transportation Research Procedia*, 2021. Vol. 55. P. 1081-1089. ISSN 2352-1465. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.079>
7. Rubio M.D.C., Moreno F., Martínez-Echevarría M.J., Martínez G., Vázquez J.M. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *J. Clean. Prod.* 2013. Vol. 41, P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.036>
8. Capitão S., Picado-Santos L., Martinho F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2012. Vol. 36. P. 1016-1024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>
9. Hill B. Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures incorporating reclaimed asphalt pavement. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA, 2011.
10. Loprencipe G, Moretti L, Saltaren Daniel M. Fatigue Resistance of RAP-Modified Asphalt Mixes Versus Conventional Mixes Using the Indirect Tensile Test. *A Systematic Review. Designs*. 2025. Vol. 9(5):104. <https://doi.org/10.3390/designs9050104>
11. Afshar Yousefi, Ali Behnood, Ata Nowruzzi, Hamzeh Haghshenas, Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 268. 121200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121200>
12. Mohammad Ashiqur Rahman, Musharraf Zaman, Syed Ashik Ali, Rouzbeh Ghabchi & Sagar Ghos. Evaluation of mix design volumetrics and cracking potential of foamed Warm Mix Asphalt (WMA) containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *International Journal of Pavement Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1902522>
13. Saleh, A., & Gáspár, L. Functional and environmental impacts of the use of reclaimed asphalt pavement materials and of foamed asphalt. *Acta Technica Jaurinensis*. 2021. Vol. 14(2). P. 212–227. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00590>
14. D. B. Sánchez, G. Airey et al., Effect of foaming technique and mixing temperature on the rheological characteristics of fine RAP-foamed bitumen mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. 2020. Vol. 21 (8). P. 2143-2159. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593228?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
15. Bohn KA, Thives LP, Specht LP. Physical, Rheological, and Permanent Deformation Behaviors of WMA-RAP Asphalt Binders. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(18):13737. <https://doi.org/10.3390/su151813737>
16. Mohammad Naser, Mu tasim Abdel-Jaber, Rawan Al-shamayleh, Nawal Louzi, Reem Ibrahim. Evaluating the effects of using reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate on the behavior

of hot mix asphalts. *Transportation Engineering*, 2022. Vol. 10. 100140. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100140>

17. Mallick R.B., Kandhal P.S., Bradbury R.L. Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*. 2008. Vol. 2051. P. 71-79. https://doi.org/10.3141/2051-09?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

18. Sengoz B., Topal A., Oner J., Yilmaz M., Dokandari, P.A., Kok B.V. Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Pavement. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 2016, Vol. 61, P. 117–127. <https://doi.org/10.3311/PPci.8498>

19. Liz á rraga J.M., Del Barco-Carri ó n A.J., Ramírez A., Díaz, P., Moreno-Navarro F., Rubio M.C., Rubio-Gámez M. Mechanical performance assessment of half warm recycled asphalt mixes containing up to 100% RAP. *Mater. Construc.* 2017. Vol. 7, 129. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.05116>

20. Marcobal J.R., Liz á rraga J.M., Gallego J. Laboratory Compaction Study and Mechanical Performance Assessment of Half-Warm Mix Recycled Asphalt Mixtures Containing 100% RAP. *Materials*. 2019. 12.

https://doi.org/10.3390/ma12121992?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

Дата надходження до редакції 24.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 11.01.2026.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ
ЗОЛИ-ВИНЕСЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТОВИХ ШАРІВ****EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE PATTERNS OF FLY ASH INFLUENCE ON THE
PROPERTIES OF SOIL LAYERS**

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

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



Скоропадський Віктор Вікторович, аспірант кафедри транспортного
будівництва та управління майном, Національний транспортний
університет, Київ, Україна,
e-mail: viktorap333@gmail.com,
тел. +380960736425.

<https://orcid.org/0000-0002-4404-7447>

Анотація. У статті розглянуто можливість використання золи-винесення теплових електростанцій (ТЕС) для стабілізації ґрунтів в дорожньому будівництві. Актуальність дослідження обумовлена дефіцитом придатних природних ґрунтів та необхідністю використання промислових відходів для сталого розвитку. Проаналізовано та узагальнено сучасні наукові дослідження щодо впливу золи-винесення у поєднанні з різними активаторами на фізико-механічні властивості ґрунтів. Показано, що введення золи сприяє формуванню цементацийних зв'язків у структурі ґрунту, зменшенню пластичності та підвищенню показників міцності. Ефективність стабілізації ґрунту залежить від вмісту золи, її властивостей та умов тверднення. На основі аналізу наукових джерел обґрунтовано програму та методику проведення експериментальних досліджень, визначено перелік контрольованих властивостей, а також варіації вмісту золи та цементу у сумішах. Шляхом лабораторних експериментів виявлено закономірності зміни властивостей укріплених ґрунтів залежно від вмісту золи. Окрему увагу приділено дослідженню комплексного в'язучого «зола-винесення – цемент». Доведено, що раціональне поєднання цих компонентів дозволяє суттєво підвищити морозостійкість та тріщиностійкість ґрунтових основ. У роботі деталізовано методику проведення досліджень, а також представлено та проаналізовано результати експериментальних випробувань. Використання золи – перспективний напрям покращення інженерних властивостей ґрунтових споруд, що сприяє зменшенню використання цінних природних ресурсів за рахунок їх заміни техногенними відходами. Отримані результати свідчать про ефективність стабілізації ґрунтів золою та доцільність подальших досліджень з метою підвищення ефективності дорожнього будівництва та реалізації принципів сталого розвитку.

Ключові слова: зола-винесення, стабілізація ґрунтів, будівництво, дорожнє будівництво, фізико-механічні властивості ґрунтів, укріплення ґрунтів, несна здатність, ущільнюваність ґрунту, земляне полотно, дорожній одяг, транспортна інфраструктура, вторинні матеріали, сталий розвиток, утилізація відходів.

Вступ. Стрімка індустріалізація, швидкий розвиток інфраструктури та розширення будівництва призвели до дефіциту природних матеріалів, зокрема і для будівельної галузі. Ґрунт є найпоширенішим та найдешевшим будівельним матеріалом, який використовується в різних напрямках будівництва, починаючи від дорожньої сфери і закінчуючи цивільним будівництвом. Попри загальну доступність ґрунту, у певних регіонах спостерігається його гостра нестача, спричинена незадовільними фізико-механічними характеристиками місцевих ґрунтів. Транспортування ж ґрунту на великі відстані недоцільне та економічно не вигідне. Це обумовлює низку проблем під час будівництва дорожніх насипів земляного полотна, що потребують значних обсягів відповідного за властивостями ґрунту.

У разі використання непридатного ґрунту в насипі виникають негативні наслідки: нестабільність конструкції, недостатня несна здатність, низька стійкість, пучинистість тощо. Ці фактори впливають на прискорене руйнування конструкції і як наслідок – експлуатаційний термін споруди зменшується в кілька разів. Тому покращення властивостей ґрунту шляхом додавання добавок є предметом значного дослідницького інтересу в галузі геотехнічної інженерії. Найпоширенішим матеріалом для укріплення ґрунтів є цемент та вапно. Але поряд з ними існує перспективний матеріал, який може також покращувати властивості ґрунтів, це зола-винесення ТЕС [1]. Зола-винесення в ґрунті виконує роль укріплення (стабілізації) та модифікації залежно від її хімічного складу і відповідних властивостей. Даний побічний продукт ТЕС наразі в Україні використовується в незначному обсязі, близько 8% від обсягу утворення, за іншими даними – до 20% [2], а решта накопичується у відвалах, що створює значні екологічні ризики.

Враховуючи дешевизну золи-винесення та негативний вплив на довкілля, необхідні додаткові дослідження взаємодії цього матеріалу з ґрунтами. Це дозволить науково обґрунтувати ефективність застосування золи-винесення для покращення ґрунтових характеристик та збільшити обсяги її використання у дорожньому будівництві. Дослідження властивостей ґрунту, стабілізованого золою, є актуальним також для впровадження принципів сталого розвитку та розробки ефективних інженерних рішень щодо зміцнення дорожніх насипів і шарів дорожнього одягу.

Доцільність використання побічних продуктів енергетичної галузі, зокрема зол-винесення, підтверджена багатьма дослідженнями та обсягами використання в інших країнах. До прикладу, обсяги використання золи в різних країнах: Китай 67% від загального обсягу утворення, Індія – 63%, США – 54%, ЄС – 90%, Японія – 96%, Австралія – 50%, Канада – 80%. Великі обсяги використання даного матеріалу пов'язані з високим рівнем досліджень та успішними прикладами застосування [3].

Аналіз літературних джерел [4 – 11] показує, що стабілізація ґрунтів є важливим методом покращення фізико-механічних властивостей земляного полотна та конструкцій дорожнього одягу. Одним із найпоширеніших підходів є введення хімічних добавок (цементу, вапна, геополімерів, армувальних волокон тощо), які ініціюють реакції зміцнення. Отримані результати свідчать, що використання золи-винесення разом із вторинними добавками є ефективним та економічно доцільним способом стабілізації слабких ґрунтів. Такий підхід забезпечує підвищення міцності й довговічності дорожніх конструкцій, сприяє утилізації промислових відходів, зменшенню потреби у портландцементі та скорочує викиди CO₂ пов'язані з його виробництвом.

У даному дослідженні розглядається використання золи-винесення як добавки до ґрунту в поєднанні з цементом-стабілізатором. Комплексна стабілізація забезпечує довговічність конструктивних шарів та економічну ефективність експлуатації дороги.

Метою дослідження є встановлення науково обґрунтованих закономірностей впливу золи-винесення Дарницької ТЕС (як окремої добавки, так і в складі комплексного в'язучого з цементом) на процеси структуроутворення та зміну фізико-механічних властивостей ґрунтів, для підвищення міцності та довговічності конструктивних шарів дорожнього одягу.

Завдання дослідження:

1. Дослідити вплив дозування золи-винесення на параметри стандартного ущільнення (максимальну щільність скелета та оптимальну вологість) супіску пилюватого.
2. Оцінити зміну деформаційних характеристик (модуля пружності та модуля деформації) ґрунтових сумішей залежно від вмісту золи та рівня вертикального навантаження за допомогою штапових випробувань.
3. Встановити характер зміни параметрів опору зсуву (кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення) стабілізованих ґрунтів за різних значень вертикальних напружень.
4. Експериментально визначити оптимальні співвідношення в комплексних системах «ґрунт – зола-винесення – цемент» за критеріями границі міцності на стиск та розтяг при згині після 28 діб тверднення.
5. Дослідити морозостійкість отриманих композитів та встановити вплив вмісту золи на збереження міцнісних характеристик матеріалу після циклічного заморожування-відтавання.

Методи дослідження: експериментальний, порівняльно-аналітичний, метод моделювання натурних умов.

Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів. Для досягнення поставленої мети в лабораторії дорожньо-будівельних матеріалів та хімії НТУ було проведено серію лабораторних випробувань, першим етапом яких стало визначення характеристик вихідної сировини та обґрунтування вибору об'єктів дослідження.

Характеристика вихідної сировини та обґрунтування вибору об'єктів дослідження

Для проведення лабораторних досліджень в якості ґрунту був обраний супісок пилюватий (табл.1), який є одним із найпоширеніших типів ґрунтів в Україні (охоплює близько третини території). Вибір даного типу ґрунту обумовлений його складними геотехнічними властивостями: низькою міцністю, високою капілярністю та чутливістю до зволоження. У дорожньому будівництві використання таких ґрунтів без стабілізації може призводити до просідання земляного полотна та швидкої втрати несної здатності внаслідок перезволоження.

Таблиця 1 – Властивості ґрунту для визначення виду ґрунту**Table 1** – Soil properties for determining soil type

Вид матеріалу	Вміст фракцій мм в %								W _L	W _p
	>2	1-2	0,5-1	0,5-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,02-0,005	<0,005		
Супісок	0	0,07	1,43	16,20	40,50	36,35	3,03	2,42	20,55	14,8
	Піщана фракція 58,20%					Пилувата 39,38%		Глиниста 2,42%		

Дослідженнями пікнометричним методом згідно з ДСТУ 4745:2007 встановлено щільність частинок – 2,707 г/см³, насипна щільність – 1,221 г/см³ відповідно до ДСТУ ISO 17892-2:2021, за розрахунками пористість становить – 49%.

Для стабілізації ґрунту використовували комплексну в'язучу систему, що складалася із золи-винесення та портландцементу.

В якості золи-винесення під час лабораторних досліджень була використана зола Дарницької ТЕС, отримана від спалювання кам'яного вугілля. Згідно з роботою [12] понад 90% частинок зол-винесення дрібні і мають питому поверхню 4380 см²/г. Для встановлення гранулометричного складу досліджуваної золи-винесення було виконано лабораторне випробування згідно ДСТУ 8772:2018, ДСТУ Б В.2.1-19:2009, результати якого представлені в таблиці 2.

Аналіз гранулометрії (табл.2) свідчить, що 94,15% золи становлять фракції розміром 10–71 мкм, які

визначають її високу питому поверхню. Дрібнодисперсна структура сприяє ущільненню ґрунтів, низька щільність дозволяє зменшувати масу конструкцій. Завдяки даним властивостям матеріал можна успішно використовувати для стабілізації ґрунтів, як мінеральну добавку до цементу або самостійно. Сферична форма частинок, характерна для золи-винесення Дарницької пилувугільної ТЕС, покращує реологічні властивості сумішей та сприяє щільнішому пакуванню зерен у структурі ґрунту.

Згідно з ДСТУ 8772:2018 проведено випробування та встановлено: щільність частинок – 2,365 г/см³, насипна щільність – 1,221 г/см³, пористість – 48% за результатами розрахунків.

Таблиця 2 – Гранулометрія золи-винесення Дарницької ТЕС

Table 2 – Granulometry of fly ash of Darnytsia TPP

Матеріал	Вміст фракцій мм в %							
Зола- винесення	(Набір сит I)							
	>2	1-2	0,5-1	0,5-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,02-0,005	<0,005
	0	0	0	0,15	26,04	71,24	1,14	1,43
	(Набір сит II)							
			2,5-1,25	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,14	0,14-0,071	<0,071
			0	0	0	0,30	2,83	96,87

За хімічним складом зола-винесення є алюмосилікатним матеріалом із домінуванням оксидів кремнію (SiO₂ – 52,3%), алюмінію (Al₂O₃ – 31,5%) та заліза (Fe₂O₃ – 9,2%), що згідно з даними Соколова О. В. [12] визначає її високу пуцоланову активність. Мінералогічний склад представлений склоподібною аморфною фазою, мулітом (Al₆Si₂O₁₃), кварцом, магнетитом та кальцієвими силікатами. Склоподібна структура, що формується внаслідок швидкого охолодження залізо-алюмосилікатного розплаву, забезпечує здатність золи вступати в реакцію з Ca(OH)₂ з утворенням цементуючих гідросилікатів кальцію [13]. Передбачається, що це сприятиме суттєвому підвищенню міцності, щільності та водостійкості зміцнених ґрунтів, що підлягає експериментальній перевірці в даній роботі.

Ефективність реалізації пуцоланових властивостей золи та швидкість формування кристалізаційної структури ґрунтосуміші значною мірою залежать від наявності активатора тверднення, у ролі якого в даному дослідженні виступав портландцемент.

Для забезпечення гідралічного тверднення системи використовували портландцемент марки ПЦ 400, основні мінералогічні складові якого – аліт (C₃S), беліт (C₂S), трикальційовий алюмінат (C₃A) та чотирикальційовий алюмоферит (C₄AF), які забезпечують процеси гідратації та формування міцної цементної структури. Використання цементу даної марки дозволяє досягти нормативної міцності при стиску (не менше 40 МПа на 28 добу) та забезпечити стабільні показники морозостійкості зміцненого ґрунту.

Програма та методологія експериментальних досліджень

Головною метою експериментальної частини дослідження була порівняльна оцінка ефективності стабілізації супіску пилуватою золою-винесення як самостійним в'язучим, так і в складі комплексної системи з додаванням портландцементу. Програма досліджень була розділена на два етапи:

1. Дослідження ґрунту, стабілізованого лише золою-винесення. На цьому етапі визначали оптимальні параметри ущільнення (максимальну щільність та оптимальну вологість) згідно з ДСТУ Б В.2.1-12:2009, а також показники несної здатності та граничного опору зсуву. Випробування на ущільнення допомагають дослідити поведінку ґрунту під час ущільнення, тоді як випробування несної здатності та опору зсуву використовуються для визначення міцності ґрунту як земляного полотна.

2. Дослідження ґрунту, укріпленого комплексною сумішшю (зола + цемент). Для оцінки роботи зміцнених шарів у конструкціях дорожнього одягу проводили визначення:

– границі міцності при стиску, що визначає несну здатність конструкції;

– міцності на розтяг при розколі для оцінки тріщиностійкості матеріалу під впливом транспортних навантажень;

– морозостійкості для прогнозування довговічності та експлуатаційної стабільності структури в умовах циклічного заморожування-відтавання.

Такий комплексний підхід до тестування дозволив встановити закономірності формування структури стабілізованого ґрунту (супіску) та визначити раціональні сфери застосування отриманих композитів у дорожньому будівництві.

Підготовка зразків та склади сумішей. Для забезпечення чистоти експерименту перед проведенням випробувань всі вихідні матеріали були висушені до абсолютно сухого стану, після чого були виготовлені досліджувані зразки.

На першому етапі досліджень, з метою вивчення впливу золи-винесення на фізико-механічні властивості ґрунту, було прийнято наступні склади композицій: Г100 – 100% ґрунту (контрольний зразок); Г90310 – 90% ґрунту та 10% золи; Г80320 – 80% ґрунту та 20% золи; Г70330 – 70% ґрунту та 30% золи.

Порядок виконання та результати лабораторних випробувань зразків «ґрунт-зола» та «ґрунт-зола-цемент»

Визначення максимальної щільності та оптимальної вологості досліджуваних зразків ґрунту проведено відповідно до ДСТУ Б В.2.1-12:2009 шляхом послідовного зволоження сумішей з кроком 1%. Це дозволило охопити діапазон стану ґрунту від недостатньо зволоженого до перезволоженого. Ущільнення зразків здійснювали на приладі для стандартного ущільнення шляхом трамбування ґрунту ударами вантажу з висоти 30см кількістю ударів – 40. Потім визначалася щільність зразка і відбиралися 2 проби для визначення вологості та перерахунку сухої щільності матеріалу. Також додатково визначалися показники границі текучості та розкочування (табл.3, рис. 1, 2).

Таблиця 3 – Результати випробування з визначення максимальної щільності

Table 3 – Results of the test for determining maximum density

Вид суміші	Вміст золи	Щільність ґрунту, г/см ³	Щільність скелета ґрунту, г/см ³	Оптимальна вологість ґрунту W, %	Пористість, %	Границя текучості, W _L , %	Границя розкочування, W _P , %
Г100	0	2,276	2,059	10,58	23,94	20,55	14,8
Г90310	10	2,284	2,065	10,62	22,74	21,31	15,35
Г80320	20	2,271	2,061	10,21	21,88	21,62	16,59
Г70330	30	2,194	1,994	10,07	23,45	22,44	17,27

Аналіз результатів (рис.1, 2) показує, що додавання до 20% золи підвищує щільність скелета ґрунту. Подальше збільшення вмісту добавки призводить до зниження щільності і для 30% золи вона стає нижчою за показник чистого ґрунту. Це обумовлено тим, що висока дисперсність та сферичність зерен золи сприяють кращому ущільненню суміші за рахунок зниження внутрішнього тертя («ефект підшипника») та формування щільної структури шляхом заповнення пор. Це підтверджують також показники пористості, які знижуються після додавання золи в кількості до 20%, а далі відбувається зростання пористості. Воно може свідчити про надлишок вмісту золи, за якого пористість виникає вже в самій структурі дрібнодисперсного заповнювача. Спад щільності суміші із вмістом 30% золи пов'язаний з низькою щільністю частинок золи, які впливають на загальний показник. Така ж тенденція спостерігається в роботі [14]. Введення понад 10% золи призводить до зниження оптимальної вологості суміші. Даний ефект пояснюється реологічними властивостями мікросфер золи, які полегшують взаємне переміщення зерен ґрунту під час ущільнення. Отримані результати узгоджуються з відомими даними [10] та підтверджують, що введення золи сприяє підвищенню границь текучості (W_L) і розкочування (W_P). Це розширює робочий діапазон вологості суміші, дозволяючи зберігати її оптимальну консистенцію навіть за підвищеного вмісту води.

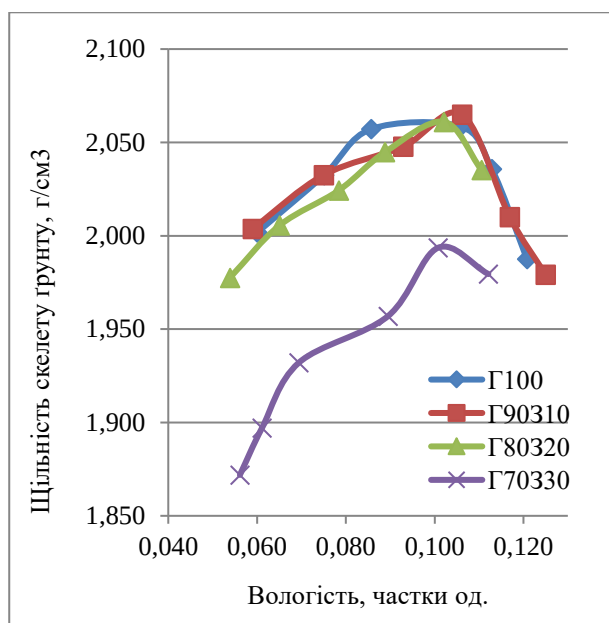


Рисунок 1 – Графік зміни щільності сумішей

Figure 1 – Graph of changes in the density of mixtures

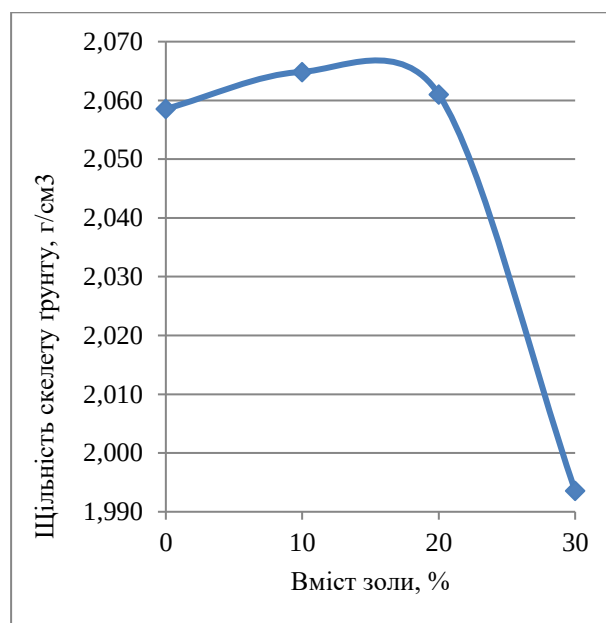


Рисунок 2 – Графік залежності щільності від вмісту золи

Figure 2 – Graph of dependence of density on ash content

Визначення модуля деформації та пружності проводилося шляхом штампових випробувань в ємності встановленого об'єму. Всі випробування проводилися за максимальної щільності та оптимальної вологості. Навантаження на штамп здійснювалося в ступінчастому режимі. На кожному ступені навантаження знімалися відліки переміщення з індикатору годинникового типу після стабілізації просідань. Було виконано 3 етапи навантажень по 4 ступені навантаження і розвантаження в кінці етапу. В результаті проведених досліджень було встановлено значення деформацій залежно від навантаг та показники модуля пружності і модуля деформації (табл.4, 5, рис.3-5).

Таблиця 4 – Залежність деформацій від навантаг та типу суміші

Table 4 – Dependence of deformations on load and type of mixture

Навантага на штамп, Н	Повне вертикальне переміщення за індикатором, мм			
	Г100	Г90310	Г80320	Г70330
0	0	0	0	0
50	0,17	0,27	0,32	0,29
100	0,51	0,55	0,66	0,6
150	0,83	0,83	0,99	0,91
200	1,12	1,1	1,33	1,2
300	1,78	1,7	2,04	1,87
400	2,29	2,17	2,65	2,74
500	2,83	2,64	3,34	3,67
600	3,46	3,1	4,06	4,63
700	4,31	3,89	4,92	6,04
800	5,02	4,3	5,3177	7,02
900	5,45	4,83	5,82	8,3
1000	6,4	5,45	6,77	9,58

Таблиця 5 – Показники модуля пружності і модуля деформації
Table 5 – Indicators of the modulus of elasticity and modulus of deformation

Параметри	Вид суміші			
	Г100	Г90310	Г80320	Г70330
Максимальний тиск I етапу МПа	0,637			
Модуль пружності I етапу, МПа	50,56	60,67	82,73	82,73
Модуль деформації I етапу, МПа	31,44	32,02	26,48	29,35
Максимальний тиск II етапу МПа	1,911			
Модуль пружності II етапу, МПа	80,29	82,73	105,00	105,00
Модуль деформації II етапу, МПа	30,53	34,08	26,02	22,82
Максимальний тиск II етапу МПа	3,185			
Модуль пружності III етапу, МПа	126,39	130,00	137,88	162,50
Модуль деформації III етапу, МПа	27,51	32,31	26,01	18,38

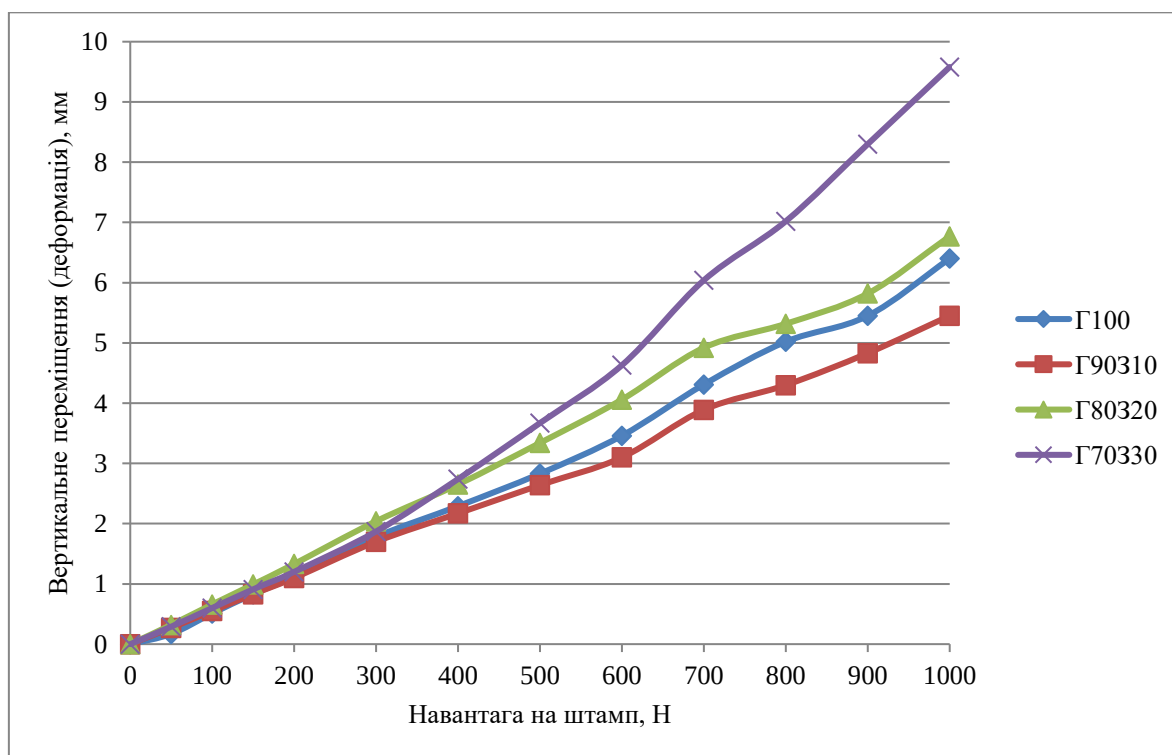


Рисунок 3 – Графік залежності зміни деформації від навантаження та типу суміші
Figure 3 – Graph of the dependence of the change in deformation on the load and type of mixture

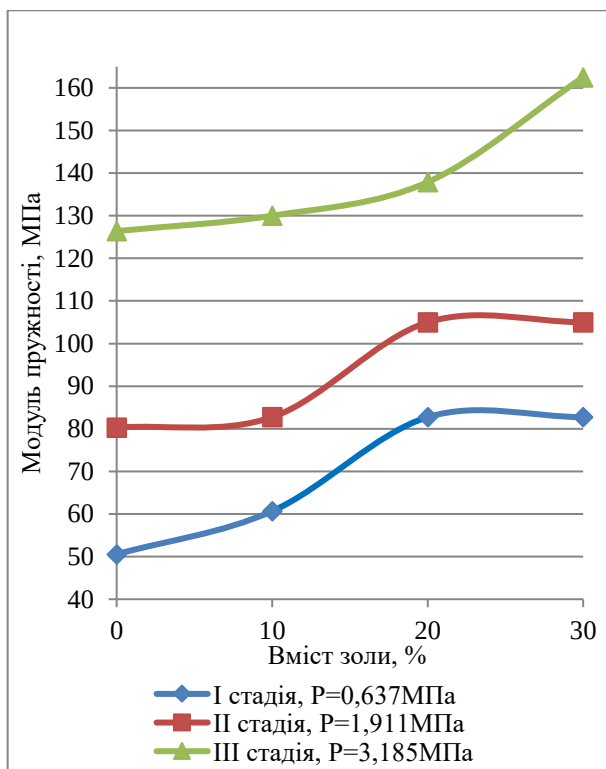


Рисунок 4 – Графік зміни модуля пружності
Figure 4 – Graph of change in elasticity

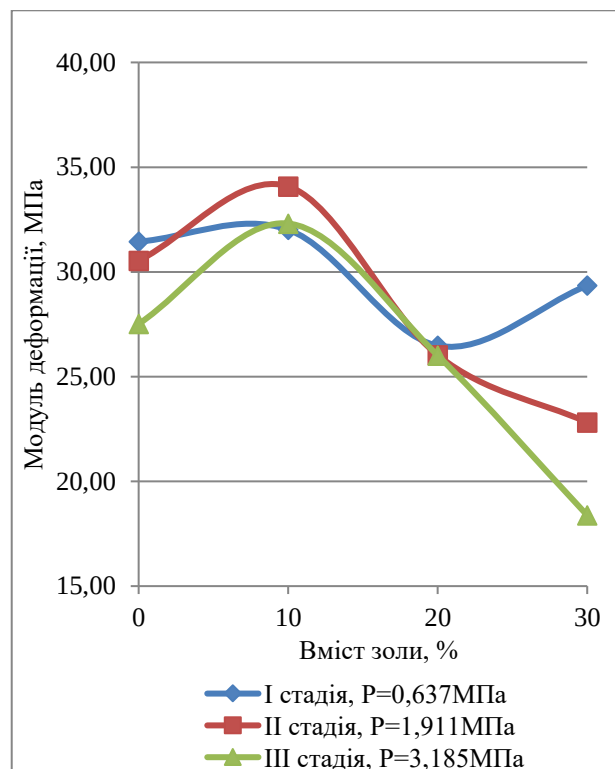


Рисунок 5 – Графік зміни модуля деформації
Figure 5 – Graph of change in deformation modulus

Аналіз результатів експериментальних досліджень (табл.4, 5, рис.3-5) свідчить про те, що найменші деформації спостерігаються в суміші Г90310. Вони менші, ніж деформації за аналогічних навантажень в контрольному зразку ґрунту Г100. Введення 20% золи зумовлює певний приріст деформацій, що суттєво не відхиляється від показників контрольного складу. Разом з тим, у зразка Г70330 спостерігаються значні деформації, особливо під час значних навантажень. На початковому етапі навантаження деформації подібні до показників контрольного зразку, але зі збільшенням навантаження деформації значно зростають. Це пов'язано з рухомістю зерен і недостатніми внутрішніми силами, які не можуть протидіяти зовнішнім впливам, тому штамп заглиблювався на максимальні значення в суміші з вмістом золи 30%. Разом з тим пружні деформації зменшувалися зі збільшенням вмісту золи. На графіку (рис.3) видно, що чим більша прикладена навантага, тим більше значення відносної деформації. На I та II етапі навантаження відбувається зростання модуля пружності зі збільшенням вмісту золи до 20% (рис.4). В цей момент досягається максимум і він не змінюється до вмісту золи 30%. Але на III стадії навантаження спостерігається пряма залежність модуля пружності від вмісту золи. Модуль деформації зростає під час введення золи в кількості 10% на трьох стадіях навантаження, після чого спадає до досягнення 20% вмісту золи. На I стадії навантаження в суміші Г70330 відбувається зростання модуля деформації, що може свідчити про доуцільнення суміші за малих навантаж. Подальше збільшення навантаги приводить до зменшення модуля деформації суміші Г70330 (рис.5). Причина така ж, як і під час деформації даної суміші. Про збільшення несної здатності ґрунтів укріплених золами також згадується в роботі [15].

Визначення граничного опору зсуву визначалося згідно з ДСТУ Б В.2.1-4-96 шляхом відтворення натурного характеру руйнування зсуву в лабораторних умовах методом одноплощинного зрізу на приладі плоского зрізу конструкції І.М. Літвінова. Зріз відбувався під кутом, що зменшує вплив тертя між частинами приладу і позитивно впливає на точність вимірювань. Зразки ущільнювалися до максимальної щільності за оптимальної вологості в спеціальних ємностях і встановлювалися в робоче

положення приладу. Для визначення опору зсуву виконувалося 3 випробування для різних значень вертикальних напружень – 0,2, 0,3, 0,4 МПа. Після фіксації зразків і прикладання вертикального напруження здійснювали горизонтальне навантаження за допомогою вантажів масою 0,1 та 0,05кг, що відповідають силі 25 та 12,5 Н відповідно. Збільшення горизонтальних навантаж відбувалося до моменту зриву однієї частини відносно іншої, або до моменту горизонтального переміщення більше, ніж на 5мм. Саме ця навантага і є граничним опором зсуву. За отриманими результатами опору зсуву визначалися коефіцієнти внутрішнього тертя та питоме зчеплення зразків. Результати випробувань наведені в табл.6 та на рис.6.

Таблиця 6 – Показники опору зсуву, кута внутрішнього тертя, питомого зчеплення

Table 6 – Shear resistance, angle of internal friction, specific adhesion

Вид суміші	Вміст золи	№ випробування	Вертикальне напруження, МПа	Зсувна навантага, Н	Граничний опір зсуву, МПа	Кут внутрішнього тертя, град.	Питоме зчеплення С, МПа
Г100	0	1	0,2	450	0,18	16,70	0,12
		2	0,3	525	0,21		
		3	0,4	600	0,24		
Г90310	10	1	0,2	400	0,16	21,80	0,08
		2	0,3	500	0,2		
		3	0,4	600	0,24		
Г80320	20	1	0,2	375	0,15	25,41	0,055
		2	0,3	487,5	0,195		
		3	0,4	612,5	0,245		
Г70330	30	1	0,2	350	0,14	28,81	0,03
		2	0,3	487,5	0,195		
		3	0,4	625	0,25		

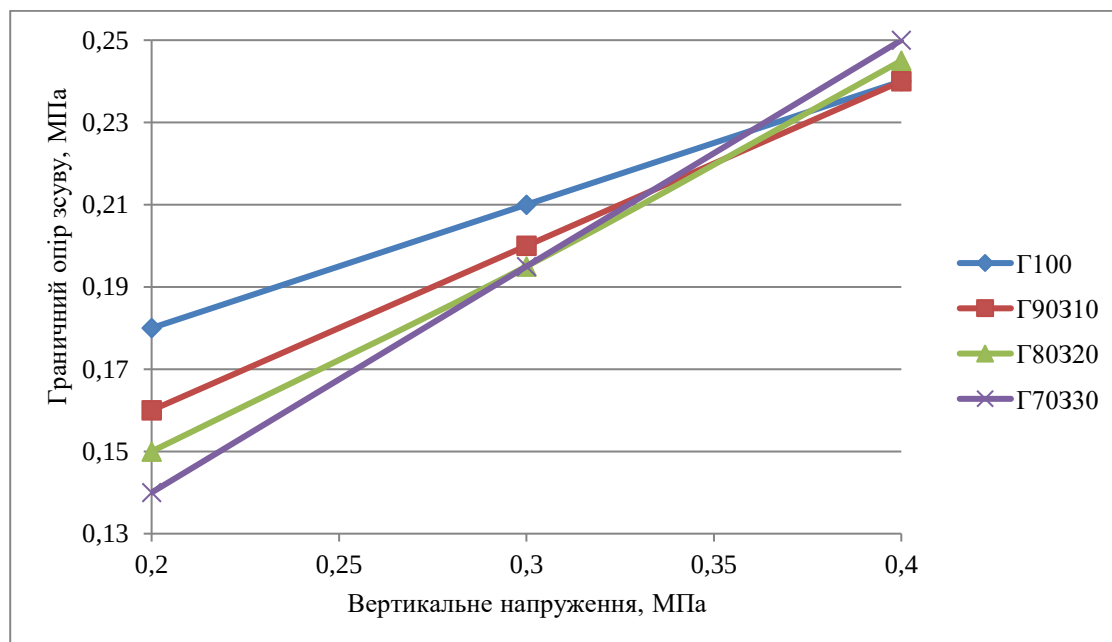


Рисунок 6 – Графік залежності опору зсуву від вмісту золи

Figure 6 – Graph of shear strength versus ash content

На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень (табл.6, рис.6) можна зробити висновок про те, що вплив вмісту золи прямо пропорційний до кута внутрішнього тертя і обернено-пропорційний до питомого зчеплення. Для малих вертикальних напружень опір зсуву сумішей із золою гірший, ніж у вихідного ґрунту. Проте в реальних умовах, в масивних конструкціях, де діє великий вертикальний тиск, суміші із золою мають кращий опір зсуву, ніж звичайний ґрунт. Водночас, що більший вміст золи (до 30% за результатами дослідження), тим більший граничний опір зсуву. За дослідженням [16] також встановлено, що зола підвищує показник кута внутрішнього тертя ґрунтів.

Визначення границі міцності на стиск, згин, морозостійкості ґрунту із золою проводили з додаванням цементу. Для цього кожен раніше сформований склад розділявся на 3 підсклади з вмістом цементу 3, 5, 7% відповідно. Загалом отримано 12 різновидів сумішей з різними комбінаціями вмісту золи (0, 10, 20, 30%) та цементу (3, 5, 7%). Поєднання золи з цементом сприяє синтезу тобермориту з утворенням піни, яка поступово заповнює порожнечі. Це забезпечує формування монолітної, стійкої та надійної мікроструктури зміцненого ґрунту [17, 18]. До даних сумішей додавалася вода в кількості, що задовольняє умову оптимальної вологості. З сумішей формувалися зразки-циліндри висотою та діаметром 50,5 мм відповідно до ДСТУ Б В.2.7-309:2016 в спеціальних металевих формах на пресі під тиском ($15,0 \pm 0,2$) МПа протягом 3хв. Зразки витримувалися протягом 28 діб в ексікаторах за температури 20°C для набору ними міцності. Далі виконувалися випробування з визначення границі міцності при стиску, міцності на розтяг при розколі, морозостійкості згідно з ДСТУ Б В.2.7-309:2016. Перед випробуванням всі зразки насичувалися водою.

Водонасичені зразки випробовували на стиск зі швидкістю руху плити ($3,0 \pm 0,1$) мм/хв. За границю міцності приймали максимальне напруження, зафіксоване в момент механічного руйнування.

Міцність на розтяг при розколі визначали методом розколювання водонасичених зразків за твірною (аналогічно до схеми випробувань на стиск). Ці дані слугували базою для обчислення границі міцності матеріалу на розтяг при згині.

Морозостійкість матеріалу оцінювали за втратою міцності на стиск водонасичених зразків після 10 циклів заморожування-відтавання. Кожен цикл передбачав витримання зразків протягом 3,5 год за температури (-18 ± 2) °C із наступним розморожуванням за (18 ± 2) °C протягом аналогічного часу. Результати випробувань наведено в табл.7 та на рис.7-9.

Таблиця 7 – Результати випробувань міцності на стиск, морозостійкості та міцності на згин
Table 7 – Results of compressive strength, frost resistance and bending strength tests

Склад зразків	Границя міцності на стиск, МПа	Коефіцієнт морозостійкості	Міцність на згин, МПа
Г100Ц3	0,713	0	0,229
Г100Ц5	1,111	0,32	0,398
Г100Ц7	2,722	0,37	0,533
Г90310Ц3	1,092	0,12	0,290
Г90310Ц5	2,181	0,39	0,477
Г90310Ц7	3,488	0,45	0,779
Г80320Ц3	1,705	0,24	0,328
Г80320Ц5	2,066	0,45	0,490
Г80320Ц7	2,816	0,56	0,675
Г70330Ц3	1,431	0,33	0,227
Г70330Ц5	1,535	0,55	0,354
Г70330Ц7	2,491	0,76	0,478

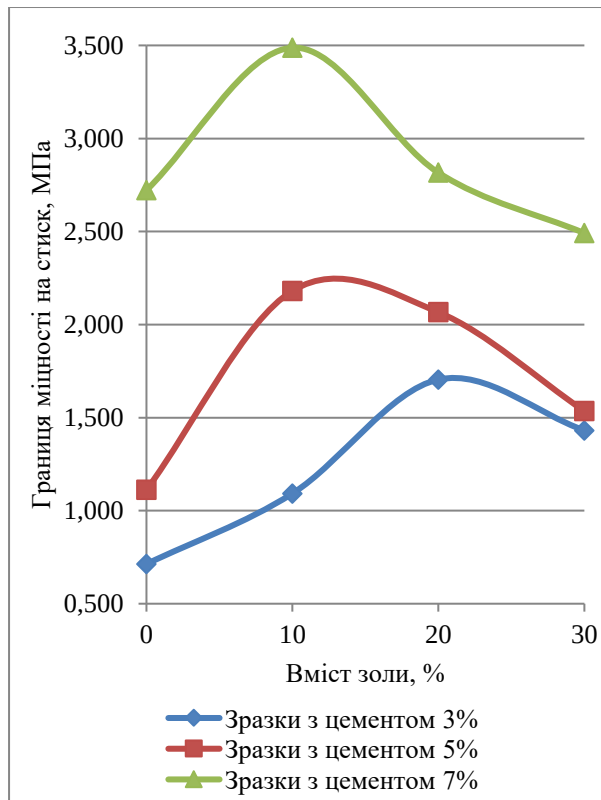


Рисунок 7 – Графік границі міцності на стиск
Figure 7 – Compressive strength limit graph

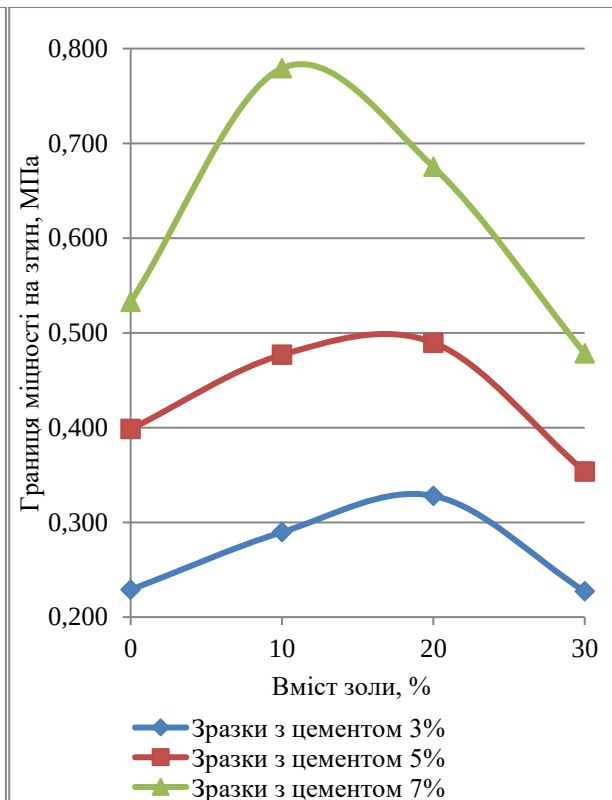


Рисунок 8 – Графік границі міцності на згин
Figure 8 – Bending strength limit graph

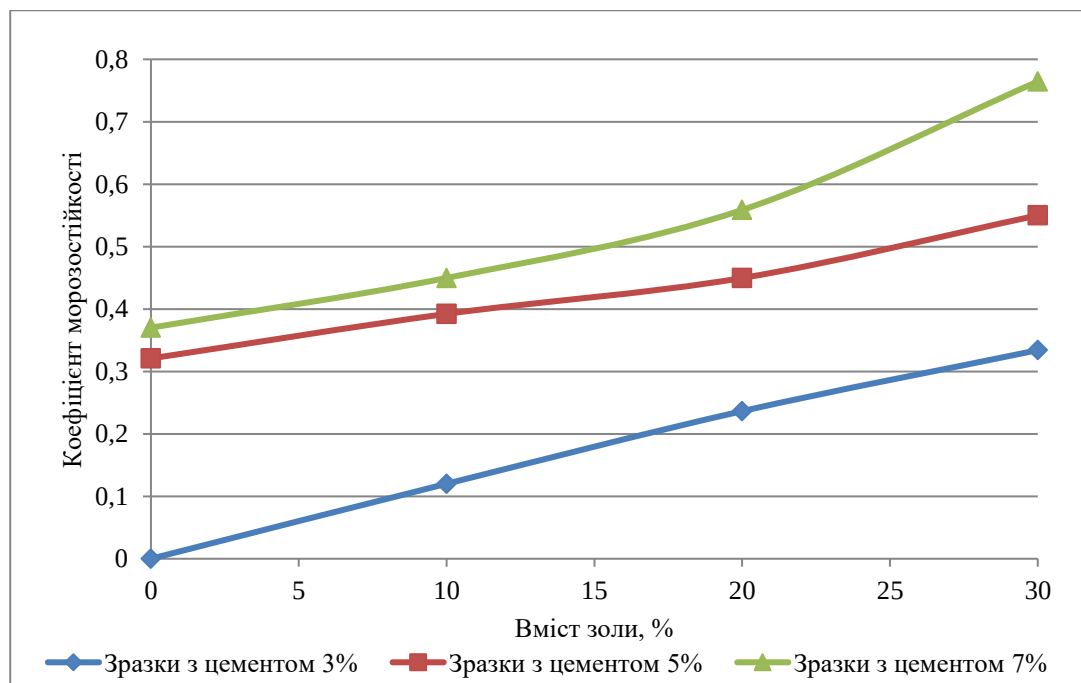


Рисунок 9 – Графік морозостійкості сумішей різного складу
Figure 9 – Frost resistance graph of mixtures of different compositions

Аналіз результатів експериментальних досліджень (табл.7, рис.7-9) показує, що вплив золи на міцність на стиск не однаковий за різних рівнів вмісту цементу. За вмісту цементу 3% у ґрунтовій суміші додавання золи збільшує її міцність і досягає максимуму за вмісту золи 20%, після чого йде на спад. Але навіть у раз вмісту золи 30% показник міцності кращий, ніж у зразків без золи. За вмісту цементу 5% відбувається зростання міцності після введення золи до 10% вмісту. Саме тоді досягаються найкращі результати. Подальше збільшення вмісту золи призводить до певного зниження міцності, проте її показники залишаються вищими порівняно зі зразками без додавання золи. Для складу ґрунтової суміші із 7% вмісту цементу найбільш раціональним є введення 10% золи, що забезпечує найвищі міцнісні характеристики, після чого зі збільшенням вмісту золи йде різкий спад міцності. В зразках Г80320Ц7 показник міцності дещо вищий, ніж в контрольного зразку без золи Г100Ц7, а в зразків Г70330Ц7 міцність нижча, ніж в контрольних зразків. Схожі результати описані в роботі [19].

Міцність на згин зразків з вмістом цементу 3 і 5% зростає після введення золи у кількості до 20%, після чого йде на спад. Для 30 % вмісту золи показники міцності на згин є нижчими, або рівноцінними контрольному складу без золи. В зразках з 7% цементу спостерігається різке зростання міцності на згин після додавання 10% золи, за якого досягається максимум показника. Після перевищення вмісту 10% відбувається зменшення міцності на згин, причому для вмісту 20% золи показник кращий, ніж в контрольних зразків без золи, а для вмісту 30% показник гірший за результати контрольного зразку.

Морозостійкість зразків під час додавання золи зростає для всього діапазону вмісту золи від 0 до 30%. Найбільший приріст спостерігається у зразків укріплених 3% цементу. Також спостерігається інтенсифікація морозостійкості зразків з вмістом цементу 7% після додавання золи від 20 до 30%. В роботі [20] також описується, що зола підвищує морозостійкість, але в поєднанні зі ЦПС.

Висновки та рекомендації

Аналіз наукових досліджень показує, що використання золи-винесення теплових електростанцій є перспективним напрямом підвищення ефективності стабілізації ґрунтів у дорожньому будівництві. Встановлено, що введення золи до складу ґрунтових сумішей змінює їхні фізико-механічні характеристики, зокрема зменшує пластичність, покращує ущільнюваність та сприяє формуванню міцних структурних зв'язків між частинками.

Показано, що застосування золи-винесення у поєднанні з цементом-активатором дозволяє суттєво підвищити показники міцності, несної здатності та стійкості ґрунтових основ до деформацій. Водночас ефективність стабілізації залежить від мінералогічного складу золи, її вмісту у суміші, типу ґрунту та тривалості тверднення.

Проведені випробування підтвердили результати зарубіжних наукових праць. Встановлено вплив золи-винесення на основні фізико-механічні показники сумішей та інженерні властивості ґрунтових шарів. Отримано залежності зміни параметрів від вмісту золи-винесення та рівня вмісту цементу. Результати свідчать про доцільність використання золи-винесення Дарницької ТЕС в поєднанні з ґрунтами, що видно на прикладі покращення властивостей супіску після стабілізації золою. Крім того, використання золи-винесення у ґрунтових конструкціях дозволить не лише покращити інженерні властивості основ, але й сприятиме зменшенню обсягів накопичення промислових відходів та раціональному використанню природних ресурсів.

Таким чином, застосування золи-винесення для стабілізації ґрунтів є технічно доцільним та екологічно обґрунтованим напрямом розвитку будівельної галузі, що потребує подальших експериментальних досліджень та впровадження у практику дорожнього будівництва.

Перелік посилань

1. Ignatova O., Sebelev I., Dyatchina A. Use of Heat Power Plants' Ash in Road Construction. *XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 953. 8 p.
2. Дерев'янюк В. М., Моспан В. І., Колохов В. В., Дзюбан О. В., Мальцев С. В. Основні напрямки досліджень із використання золи ТЕС у виробництві будівельних матеріалів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 1 (007). С. 38–44.

3. Eskioglou P., Oikonomou N. Protection of environment by the use fly ash in road construction. *Global NEST Journal*. 2008. Vol. 10, No. 1. P. 108–113.
4. Arora S., Aydilek A. H. Class F fly ash amended soils as highway base materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2005. Vol. 17, No. 6. P. 640–649.
5. Trzebiatowski B. D., Edil T. B., Benson C. H. Case study of subgrade stabilization using fly ash: State Highway 32, Port Washington, Wisconsin. *Recycled Materials in Geotechnics*. 2004. P. 123–136.
6. Mahvash S., López-Querol S., Bahadori-Jahromi A. Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization. *Heliyon*. 2017. 27 p.
7. Amadi A., Osu A. Effect of curing time on strength development in black cotton soil–quarry fines composite stabilized with cement kiln dust. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2018. Vol. 30, No. 4. P. 305–312.
8. Mishra B., Gupta M. K. Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. P. 95–107.
9. Phummiphan I. et al. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*. 2016. Vol. 17, No. 4. P. 877–891.
10. Karami H. et al. Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades. *Transportation Geotechnics*. 2021. Vol. 29. 20 p.
11. Sarkar R., Devi D., Kumar T. S. Experimental studies on fiber reinforced soil stabilized with lime and fly ash. *International Journal of Integrated Engineering*. 2024. Vol. 16, No. 5. 13 p.
12. Соколов О. В. Удосконалення технології вироблення асфальтобетонних сумішей із золою-винесення для влаштування шарів дорожнього одягу : дис. ... д-ра філософії : 192 Будівництво та цивільна інженерія. Київ : Національний транспортний університет, 2024.
13. Kumar T. A., Thyagaraj T., Robinson R. G. Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*. 2022. P. 160–171.
14. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R. K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*. 2004. Vol. 18, No. 4. P. 263–267.
15. Alawi A. et al. Enhancement of the existing soil strength using the waste materials as a stabilization resource for sustainable development. *Materials Today: Proceedings*. 2023. 6 p.
16. Simatupang M. et al. The mechanical properties of fly-ash-stabilized sands. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. P. 132.
17. Khan F., Das B., Dewanga N. Determination of geotechnical properties and stability of expansive soil using fly ash. *Walailak Journal of Science and Technology*. 2021. 18 p.
18. Noaman M. F., Khan M. A., Kausar A., Hassan A. A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 6. Article 100151. 14 p.
19. Bitar M. A., Ghida I. A., Jaber L. Using fly ash-plastic mesh bags wastes mixture as a recoverable resource for soil stabilization. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2024. Vol. 18, No. 3. 16 p.
20. Deng C., Jiang Y., Tian T., Yi Y. Laboratory mechanical properties and frost resistance of vibration-compacted cement–fly ash slurry and cement–fly ash-treated macadam mixtures. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 397. 12 p.

Experimental Research on the Patterns of Fly Ash Influence on the Properties of Soil Layers

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

Skoropadskyi Viktor V.,— PhD student of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University. E-mail: viktorap333@gmail.com, tel. +380960736425, <https://orcid.org/0000-0002-4404-7447>

Abstract. The article considers the possibility of using fly ash from thermal power plants (TPPs) for soil stabilization in road construction. The relevance of the study is driven by the deficit of suitable natural soils and the necessity of using industrial waste for sustainable development. Modern scientific research on the influence of fly ash in combination with various activators on the physico-mechanical properties of soils is analyzed and summarized. It is shown that the introduction of fly ash promotes the formation of cementation bonds in the soil structure, leading to a decrease in plasticity and an increase in strength indicators. The efficiency of soil stabilization depends on the ash content, its properties, and curing conditions. Based on the analysis of scientific sources, the program and methodology of experimental research are substantiated, the list of controlled properties is determined, and the variations of ash and cement content in the mixtures are specified. Through laboratory experiments, the patterns of changes in the properties of stabilized soils depending on the ash content were revealed. Particular attention is paid to the study of the complex binder "fly ash – cement". It is proved that the rational combination of these components significantly increases the frost resistance and crack resistance of soil bases. The paper details the research methodology and presents and analyzes the results of experimental testing. The use of ash is a promising direction for improving the engineering properties of soil structures, contributing to the reduction of valuable natural resource use by replacing them with industrial waste. The results obtained testify to the efficiency of soil stabilization with fly ash and the feasibility of further research aimed at improving the efficiency of road construction and implementing the principles of sustainable development.

Keywords: fly ash, soil stabilization, construction, road construction, physico-mechanical properties of soils, soil strengthening, bearing capacity, soil compactability, subgrade, road pavement, transport infrastructure, secondary materials, sustainable development, waste recycling.

References

1. Ignatova O., Sebelev I., Dyatchina A. Use of Heat Power Plants' Ash in Road Construction. *XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 953. 8 p.
2. Derevianko, V. M., Mospan, V. I., Kolokhov, V. V., Dziuban, O. V. and Maltsev, S. V. (2022) Main directions of research on the use of TPP fly ash in the production of building materials, *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*, (1), pp. 38–44. [In Ukrainian].
3. Eskioglou P., Oikonomou N. Protection of environment by the use fly ash in road construction. *Global NEST Journal*. 2008. Vol. 10, No. 1. P. 108–113.
4. Arora S., Aydilek A. H. Class F fly ash amended soils as highway base materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2005. Vol. 17, No. 6. P. 640–649.
5. Trzebiatowski B. D., Edil T. B., Benson C. H. Case study of subgrade stabilization using fly ash: State Highway 32, Port Washington, Wisconsin. *Recycled Materials in Geotechnics*. 2004. P. 123–136.
6. Mahvash S., López-Querol S., Bahadori-Jahromi A. Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization. *Heliyon*. 2017. 27 p.
7. Amadi A., Osu A. Effect of curing time on strength development in black cotton soil–quarry fines composite stabilized with cement kiln dust. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2018. Vol. 30, No. 4. P. 305–312.
8. Mishra B., Gupta M. K. Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. P. 95–107.
9. Phummiphan I. et al. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*. 2016. Vol. 17, No. 4. P. 877–891.
10. Karami H. et al. Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades. *Transportation Geotechnics*. 2021. Vol. 29. 20 p.
11. Sarkar R., Devi D., Kumar T. S. Experimental studies on fiber reinforced soil stabilized with lime and fly ash. *International Journal of Integrated Engineering*. 2024. Vol. 16, No. 5. 13 p.

12. Sokolov, O. V. (2024) *Improvement of the technology for producing asphalt concrete mixtures with fly ash for the construction of pavement layers*. PhD Thesis (Specialty 192 Building and Civil Engineering). Kyiv: National Transport University. [In Ukrainian].
13. Kumar T. A., Thyagaraj T., Robinson R. G. Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*. 2022. P. 160–171.
14. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R. K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*. 2004. Vol. 18, No. 4. P. 263–267.
15. Alawi A. et al. Enhancement of the existing soil strength using the waste materials as a stabilization resource for sustainable development. *Materials Today: Proceedings*. 2023. 6 p.
16. Simatupang M. et al. The mechanical properties of fly-ash-stabilized sands. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. P. 132.
17. Khan F., Das B., Dewanga N. Determination of geotechnical properties and stability of expansive soil using fly ash. *Walailak Journal of Science and Technology*. 2021. 18 p.
18. Noaman M. F., Khan M. A., Kausar A., Hassan A. A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 6. Article 100151. 14 p.
19. Bitar M. A., Ghida I. A., Jaber L. Using fly ash-plastic mesh bags wastes mixture as a recoverable resource for soil stabilization. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2024. Vol. 18, No. 3. 16 p.
20. Deng C., Jiang Y., Tian T., Yi Y. Laboratory mechanical properties and frost resistance of vibration-compacted cement–fly ash slurry and cement–fly ash-treated macadam mixtures. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 397. 12 p.

Дата надходження до редакції 13.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 03.02.2026.

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-199-212

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІДНОВЛЕННЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ДОРОЖНЬОГО ПОКРИВУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ШАРІВ ЗНОШУВАННЯ

EFFICIENCY OF RESTORATION OF CEMENT CONCRETE ROAD SURFACE USING WEARING LAYERS



Гамеляк Ігор Павлович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Системного проектування об'єктів транспортної інфраструктури та геодезії», Національний транспортний університет. Київ, Україна, e-mail: gip65n@gmail.com

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



Журавський Дем'ян Леонардович, начальник лабораторії, ДП ШРБУ №100, Київ, Україна e-mail: kievizol@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-2277-4333>

Анотація. У роботі проаналізовано міжнародний та вітчизняний досвід експлуатації цементобетонних покриттів (ЦБП) із застосуванням різних технологій улаштування шарів зношування. Розглянуто техніко-економічну ефективність методів Slurry Seal, Microsurfacing, ЦМА та ультратонких покриттів. Встановлено, що превентивне утримання є у 1,4 - 1,7 раз дешевшим за капітальний ремонт. Оцінено вплив ремонту на деградацію стану існуючого покритву та довговічність відновлених ділянок.

Ключові слова: цементобетонний покритв, шар зношування, мікропокритв, slurry seal, ефективність, ремонт, довговічність, поверхнева обробка, холодний асфальтобетон, тонкошаровий покритв.

Вступ. Цементобетонні дорожні покриття характеризуються високою несучою здатністю та довговічністю, проте в процесі експлуатації зазнають впливу транспортних навантажень, температурних коливань і водонасичення, що призводить до поступової деградації їх поверхневого шару. Найбільш ефективним способом запобігання розвитку дефектів є застосування шарів зношування, які виконують функції герметизації, підвищення зчеплення, відновлення рівності та захисту конструкції від зовнішніх впливів. Використання таких технологій дозволяє перейти від капітальних ремонтів до системи превентивного утримання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експлуатація автомобільних доріг із цементобетонним покриттям супроводжується поступовим зниженням їхніх транспортно-експлуатаційних показників під дією інтенсивного руху та кліматичних чинників. Найбільш ефективним способом запобігання деградації ЦБП є влаштування тонких захисних шарів зносу, що дозволяє відновити шорсткість, рівність та водонепроникність поверхні. У світовій практиці питання застосування шарів зношування розглядаються в нормативних документах США (FHWA, AASHTO), країн ЄС (EN), Австралії (Austroads). Дослідження показують, що тонкошарові та ультратонкі покриття забезпечують суттєве підвищення експлуатаційних характеристик без зміни конструкції дорожнього одягу.

Міжнародна практика (США, ЄС, Австралія) розглядає шар зносу як функціональний поверхневий елемент, а не лише як конструктивний шар [1-15].

Досвід США (FHWA) базується на концепції *Pavement Preservation* — раннього втручання для подовження терміну служби. Основними методами є алмазне шліфування, улаштування тонких шарів НМА та мікропокриттів [1-15].

Європейський досвід орієнтований на низькошумні покриття, зокрема технологію *Exposed Aggregate Concrete* (EAC) — бетон з оголеним заповнювачем [1-15].

У результаті порівняльного аналізу встановлено, що в США та Австралії переважає експлуатаційно-орієнтований підхід, тоді як в Україні зберігається конструктивно-орієнтована модель, що потребує гармонізації з нормами ЄС та США [1-15].

Економічний аналіз при порівнянні стратегій утримання протягом 40-річного циклу демонструє суттєву перевагу превентивних методів. Капітальний ремонт/реконструкція в США (через 15–20 років) коштує близько 640 000 дол. на одиницю виміру. Система превентивних ремонтів коштує 364 000 дол., що в 1,64 раза дешевше. Вкладений 1 долар у превентивне утримання економить від 4 до 10 доларів на майбутній реконструкції [1-15].

В Україні актуальність цього питання зумовлена відсутністю сталої системи попереджувальних ремонтів, що призводить до передчасного руйнування дороги та високих витрат на капітальний ремонт та реконструкцію. Наразі питання застосування технологій превентивних ремонтів висвітлено недостатньо, що зумовлює необхідність проведення системних досліджень.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є оцінка ефективності відновлення цементобетонних покриттів із застосуванням шарів зношування та обґрунтування рекомендацій щодо їх використання. Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати сучасні технології шарів зношування;
- дослідити їх експлуатаційну ефективність;
- виконати порівняльний аналіз;
- визначити економічну доцільність застосування.

Виклад основного матеріалу. Класифікація технологій шарів зношування

У сучасній практиці застосовуються два підходи до відновлення транспортно-експлуатаційних характеристик цементобетонних покриттів (рис. 1):

1. Відновлення поверхневих властивостей без зміни конструкції;
2. Улаштування нового тонкого шару зношування.

До основних технологій першого напрямку належать: розпилення емульсій (Fog Seal) або олій (Reclamite®); поверхнева обробка (Chip Seal); ультратонкошарові покриття.

Для реалізації другого напрямку улаштовують тонкошарові асфальтобетонні покриття із гарячого, холодного асфальтобетону або із щебеневе – мастикового асфальтобетону; мікропокриття із литих емульсійно-мінеральних сумішей на модифікованих бітумах (Microsurfacing); та шламкові емульсійно-мінеральні покриття (Slurry Seal).

Поверхневі обробки. Розпилення емульсій є найбільш простим методом, який забезпечує герметизацію мікротріщин і захист від вологи. Подовження терміну служби становить 2–4 роки. Reclamite® – це обробка асфальтобетону оліями. Вона поповнює важливі сполуки, які випарувалися протягом перших кількох років експлуатації, і зменшує розтріскування **поверхні**. Дослідження показують, що це продовжує термін служби асфальтобетону поверх цементобетону на 5 років, і є дуже економічно ефективною обробкою.

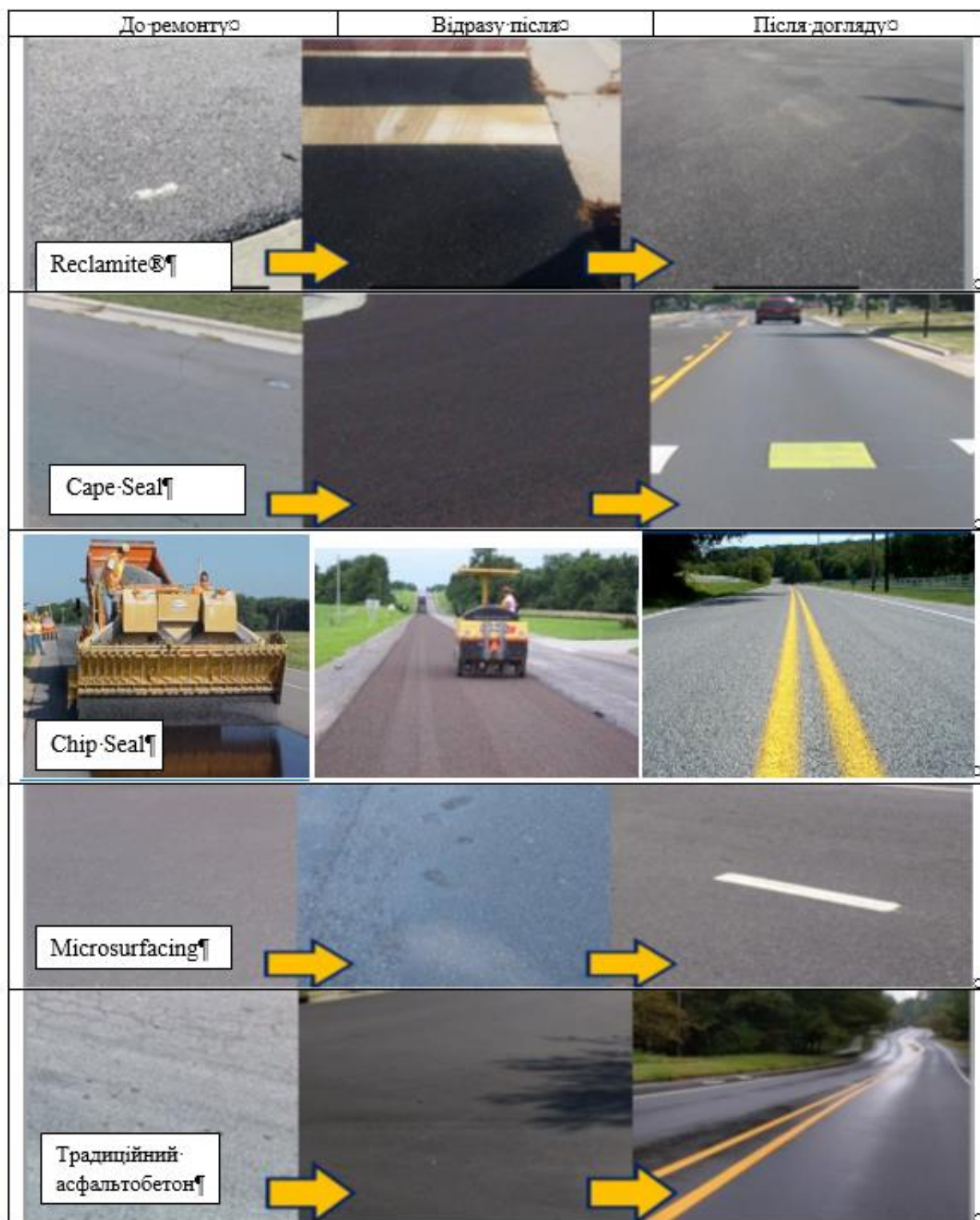


Рисунок 1 – Методи відновлення транспортно-експлуатаційних характеристик цементобетонних покриттів

Figure 1 – Methods for restoring the transport and operational characteristics of cement concrete pavements

Розпилення емульсій (Fog Seal) - це один із найпростіших та економічних методів. Основні ефекти: герметизація мікротріщин; зменшення проникності; відновлення поверхневої міцності. Термін подовження служби становить 2–4 роки залежно від стану покриття.

Технологія Chip Seal дозволяє підвищити шорсткість поверхні, підвищити водонепроникність та забезпечує подовження терміну служби на 5–7 років.

Гарячий ресайклінг на місці (Hot In-Place Recycling HIR) або Змішування на всю глибину (Full Depth Reclamation FDR) або Холодний ресайклінг на місці (Cold In-Place Recycling CIR) або + поверхнева обробка типу Чіп Сіл - ця комбінована обробка використовується переважно для захисту переробленої суміші або регенованої поверхні від проникнення поверхневої вологи. Поверхневі обробки з дрібними частинками зазвичай використовуються як варіант поверхні на дорогах з низькою інтенсивністю руху.

Очікування від поверхневої обробки прості: герметизувати тріщини та запобігати проникненню води в конструкцію дорожнього покриття. Це подовжить термін служби дорожнього покриття на 5-10 років залежно від його стану, часу проведення обробки та матеріалів, що використовуються в будівництві (табл. 1).

Поширені комбінації поверхневої обробки з іншими сучасними технологіями ремонту (рис. 2).

Поверхнева обробка покриття є найефективнішою, коли її встановлюють у потрібний час на потрібній дорозі та з дотриманням правильних будівельних практик. На успіх відколів поверхневої обробки зазвичай впливають такі фактори: стан дорожнього покриття, погода, дорожній рух, вибір матеріалів, калібрування обладнання, найкращі будівельні практики та належний огляд.

Таблиця 1 – Терміни служби поверхневих обробок

Table 1 – Service life of surface treatments

Показники	Оптимальна продуктивність	Середня продуктивність	Продуктивність тимчасового проміжку
Стан дорожнього покриття	Б	В	В
Стан PCI	80	60	40
Термін служби	7-10 років	3 - 5 років	1 - 3 роки

Примітка. Б – відповідає стану покриття з оцінкою PCI від 75 – до 85 (добрий); В – при PCI від 55 – до 65 (дуже поганий).

Щоб збільшити шанси на успіх ремонту поверхневою обробкою, найкращою практикою було б провести коротке навчання перед початком проєктів для підрядника та представника агентства, відповідального за ремонт, щоб переконатися, що всі розуміють ситуацію однаково.

Технологічні особливості шарів зносу [16 - 31].

Для відновлення ЦБП використовують кілька основних груп матеріалів:

Литі емульсійно-мінеральні суміші (ЛЕМС): *Slurry Seal* та *Microsurfacing*. Остання технологія відрізняється використанням полімер-модифікованої емульсії, що забезпечує швидке тверднення (менш ніж за 1 годину) та можливість вирівнювання колії до 25 мм. Мікропокриви - ці технології є найбільш перспективними для цементобетонних покриттів. Основні характеристики: товщина шару: 5–15 мм; полімер-модифіковані емульсії; висока адгезія до основи; швидке твердіння. Ефективність: продовження терміну служби: 6–10 років; підвищення коефіцієнта зчеплення; можливість вирівнювання колій.

Щебенево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА): Характеризується високою зносостійкістю та стабільністю завдяки жорсткому кам'яному каркасу.

Тонкошарові покриття (TashP): Включають холодні технології (наприклад, *RoadPave*), які можна укладати за температури від +5°C навіть на вологий покриття.

	Герметизація тріщин + поверхнева обробка [18]: коли тріщини в існуючій поверхні перевищують 1/4 дюйма завширшки, їх герметизація перед відколив поверхнева обробка допоможе запобігти проникненню води глибше в конструкцію дорожнього покриття після того, як тріщини відображаються крізь нову зношувану поверхню.
	Подвійні та потрійні поверхневі обробки (ПО) [18]:. Багатошарові ПО використовуються, коли потрібна більша довговічність. Такі покриття забезпечують менше шуму від транспорту, додаткову гідроізоляцію та є міцнішими покриттями порівняно з одношаровими. Ефективні в умовах високого навантаження, таких як ділянки з високим відсотком вантажного руху або на крутих схилах.
	Поверхнева обробка з розпилюванням Ця комбінована обробка використовується для блокування будь-якого пухкого заповнювача та надання ущільнювачу від тріщин гарного естетичного вигляду. Крім того, ця комбінація забезпечує розмежування смуг, що може бути перевагою для безпеки.
	Підгрунтовка із модифікованого бітуму + гаряча асфальтобетонна суміш (SAMI - проміжний шар мембрана, що поглинає напругу) - комбінована обробка використовується для уповільнення швидкості відображеного розтріскування в нових асфальтобетонних покриттях. Зазвичай вона складається з модифікованого в'язучого матеріалу для ущільнення тріщин з заповнювачем, а потім зверху укладається асфальтобетонний покриття.
	Ремонт тріщин + шлам (Сларрі Сіл) або мікропокрив для існуючих покриттів з тріщинами більше 3 - 5 мм, оптимально для використання лише шламового ущільнювача, нанесення мастики при ремонті тріщин перед шламовим ущільнювачем діє як проміжний шар, що поглинає напругу, ретельніше герметизуючи тріщини та затримуючи повторну появу відображених тріщин

Рисунок 2 – Комбіновані методи відновлення цементобетонних покриттів**Figure 2** – Combined methods for restoring cement concrete surfaces

Ефективність відновлення: результати досліджень

Дослідження на ділянках АД «Харків – Сімферополь» та в Чернігівській області показали:

Міцність та модуль пружності: Улаштування тонкошарового покриття (2–3 см) підвищує загальний модуль пружності на 5–19% лише за умови повного зчеплення з основою.

Термін служби: Для ЦБП оптимальний термін служби мікропокриття становить 6–8 років, ЩМА — 7–10 років, тоді як звичайна поверхнева обробка (Chip Seal) ефективна протягом 3–5 років.

Стан покриття (PCI): Найвища ефективність превентивних заходів досягається при індексі стану покриття (PCI) понад 60. Нанесення шару зносу при PCI 50–80 дає приріст показника на 10–20 пунктів.

Тонкошарові асфальтобетонні покриття забезпечують: відновлення експлуатаційних характеристик; підвищення коефіцієнта зчеплення; відновлення текстури; захист від проникнення вологи. Переваги: швидке введення в експлуатацію (1–4 години); зниження витрат до 30–40%; зменшення енергоспоживання та викидів CO₂.

За результатами спостережень у процесі експлуатації зафіксовано покращення зчеплення на 20–40%; зниження водопроникності; збільшення міжремонтного періоду на 30–60%. Ефективність визначається за такими показниками: довговічність; економічність; технологічність; екологічність; експлуатаційні характеристики. Напрями удосконалення технологій полягають у розробленні спеціалізованих сумішей для ЦБП; використання полімер-модифікованих емульсій; впровадження 3D-методів оцінки стану покриття; адаптація міжнародних стандартів; розвиток нормативної бази.

В Україні застосування шарів зношування знаходиться на стадії активного розвитку. Основні проблеми пов'язані з недостатнім використанням превентивних ремонтів; обмеженою нормативною базою; високою вартістю сучасних матеріалів; відсутність системних досліджень та відсутністю кваліфікованих спеціалістів.

Досвід експлуатації тонкошарового покриття, із холодного асфальтобетону RoadPave для ремонту покриттів автомобільних доріг

У рамках виконання науково-дослідної роботи за договором від 30 вересня 2025 р. № 63 “Провести дослідження щодо улаштування шарів зносу цементобетонного дорожнього покриття” запропоновано тонкошаровий покриття із високощербистої холодної асфальтобетонної суміші, використання якого забезпечить відсутність перерахованих вище недоліків вже відомих поверхневих обробок та шарів зношування. Дослідне улаштування покриття виконувалося 08 жовтня 2025 року.

Місце виконання робіт: Київська область, Сквирський район, автомобільна дорога Руда-Великополовецьке. с. Руда, по вул. Імріха Лисака ліва сторона дороги перед поворотом на вул. Залізничну, Координати 49.796126, 29.856891.

Погодні умови: температура повітря при улаштуванні покриття від +10°C до +14°C. Холодна волога погода, похмуро, сухий покриття, за день перед улаштуванням йшли сильні дощі.

Приготування та склад суміші: приготування суміші здійснювалося на асфальтобетонному заводі ДС-117. Суміш матеріалу фр. 0-10 мм перемішувалася навантажувачем та засипалася у бункер для подачі на завод. Матеріал був дуже вологим та мав температуру 11°C. На заводі матеріал підігрівався до необхідної температури. Температура суміші при виході із змішувача становила 35°C. Матеріал вивантажувався на асфальтовану площадку для накопичення.

Для виготовлення суміші використовувався бітум розріджений марки СГ 70/130 із комплексом спеціальних домішок ПАР.

Улаштування покриття: температура суміші при укладанні становила 14°C. Температура поверхні існуючого шару асфальтобетону + 14°C. Дорога зруйнована тріщинами, сіткою тріщин та невеликими вибоїнами. Суміш доставлялася на ділянку дороги за допомогою навантажувача. Ділянка дороги підміталася вручну щітками.

Укладання суміші виконувалась вручну, суміш лопатами укладалася на покриття та за допомогою гладилки для асфальтобетонної суміші, розрівнювалася товщиною 15-20 мм, ущільнювалася.

виконувалося за допомогою автомобіля ГАЗ-3302 «Газель» вагою 2150 кг, зроблено 5 ... 7 проходів по одному сліду.

Рух транспорту відкривався одразу після закінчення ущільнення. Швидкість транспорту який рухався по новому покриттю складала 60 ... 80 км/год. Швидкість руху транспорту не обмежувалася дорожніми знаками.

Областю застосування високо щебенистого холодного асфальтобетону є влаштування верхнього шару полотна мостових споруд та підходів до них, влаштування захисних шарів автомобільних доріг, міських вулиць та доріг.

Ефективність: перевагами високощебенистого холодного асфальтобетону є: висока зсувостійкість; висока стійкість до стирання; зниження рівня шуму (особливо актуально у межах міста); високе зчеплення колеса з покритвом; зниження ефекту аквапланування; додаткова гідроізоляція; укладання в холодному стані; укладання на вологий покриття; температура застосування від +5°C; можливість влаштування покриття в дощову погоду; перевезення суміші на великі відстані, можливість накопичення у Бігбегах та на складі; суміш придатна до застосування протягом декількох днів після виготовлення; застосовується для поверхневої обробки дорожніх бетонних плит; укладання шаром товщиною від 10 мм.

Для вивчення можливості застосування такої технології розроблено склад холодного високощебенистого асфальтобетону (ХВЩА) на бітумах МГ, СГ із застосуванням ПАР. Даний асфальтобетон поєднує в собі властивості щебенево-мастичного та литого асфальтобетонів і має високі експлуатаційні властивості в умовах інтенсивного руху з великим навантаженням та руху громадського транспорту.

Укладання високощебенистого асфальтобетону здійснюється за допомогою стандартного обладнання як при укладанні гарячих асфальтобетонних сумішей. Застосовуються звичайні асфальтоукладачі без доробок для укладання суміші. Для укочування застосовуються пневматичні котки. Товщина шару укладання 10-15 мм.

Суміш практично витікала із кузова при вивантаженні. Зерновий склад та вміст бітуму наведено у табл. 2.

Для виготовлення суміші застосовувався бітум рідкий марок СГ 40/70, СГ 70/130, СГ 130/200 згідно ГОСТ 11955-82 або БСГР 40/70, БСГР 70/130, БСГР 130/200 згідно СОУ 45.2-00018112-036:2009 [32] із домішками катіонових ПАР. Дослідна партія виготовлялася на стандартному АБЗ по технології гарячого асфальтобетону із мінімальним підігрівом матеріалів до температури +30-40°C. Матеріал поступав у мішалку із невеликою вологістю. Перемішування відбувалося протягом однієї хвилини. Температура бітуму при подачі у мішалку становила 90-95°C. Суміш після виготовлення була однорідна та блискуча. За своїми технологічними властивостями вона займала проміжне положення між гарячим асфальтобетоном та литим асфальтобетоном.

Таблиця 2 – Зерновий склад холодної високощебенистої асфальтобетонної суміші та вміст бітуму

Table 2 – Grain composition of cold high-crushed asphalt concrete mix and bitumen content

ХВЩА	Вміст за масою, % зерен, менших даного розміру, мм								Вміст бітуму, %
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	
	95,0	43,0	25,1	15,2	10,3	8,6	4,6	2,0	6,2
Вимоги	90-100	20-55	5-30	0-17	0-14	0-12	0-9	0-4	5,0-7,0

На наступний день були влаштовані дослідні ділянки на дорогах із малою інтенсивністю руху. Умови влаштування та фото через 0,5 року експлуатації наведені на рис. 3.

Економічна ефективність. Досвід США демонструє, що: найбільш ефективними є ранні втручання; тонкі шари посилення та мікропокриви (thin overlay та micro-surfacing) мають найкраще співвідношення ефективність/вартість для НМА; для РСС найбільш ефективні partial-depth repair та алмазне шліфування поверхні (diamond grinding); системність PMS є ключовим фактором економії бюджетних коштів.



а) вигляд стику між стрим покривом та новим шаром холодного асфальтобетону



б) загальний вигляд ділянки через пів року експлуатації

Рисунок 3 – Вигляд влаштованої дослідної ділянки із холодної високощербенистої асфальтобетонної суміші

Figure 3 – View of the constructed experimental area from cold high-crushed asphalt concrete mix

Ефективності поточних ремонтів покриттів у США узагальнено за рекомендаціями Federal Highway Administration, American Association of State Highway and Transportation Officials та National Center for Pavement Preservation; значення є типовими інтервалами для мережі доріг штатів США [15 - 31] (порівняльні таблиці (3 – 4)).

Таблиця 3 — Ефективність ремонтів (асфальтобетонні покриття НМА)

Table 3 — Repair efficiency (HMA asphalt concrete pavements)

Метод ремонту (Treatment)	Діапазон PCI до ремонту	Зміна PCI після ремонту	Строк служби, роки (мін–сер–макс)	Орієнтовна вартість, \$/м ²	Ефективність (В/С)
Crack Sealing	60–85	+5...+10	3 – 4 – 5	2–5	4–6
Fog Seal	70–90	+3...+8	2 – 3 – 4	1–3	3–5
Chip Seal	55–80	+8...+15	5 – 6 – 7	5–10	3–6
Slurry Seal	60–85	+8...+15	4 – 5 – 6	6–12	3–5
Micro-surfacing	50–80	+10...+20	6 – 7 – 8	8–15	4–7
Тонкошарове асфальтобетонне Thin HMA Overlay (25–40 мм)	40–75	+15...+30	8 – 10 – 12	15–30	3–5

Примітка: PCI — Pavement Condition Index (0–100). Вартість наведена орієнтовно у цінах США (без урахування регіональних коливань).

Узагальнений аналіз ефективності. Найвищий економічний ефект (для мережі доріг) при влаштуванні заповнення тріщин (Crack sealing) + мікропокриття (Micro-surfacing) (табл. 4).

Для аналізу зміни деградації технічного стану цементобетонного покриття без ремонту та після його виконання використовують математичні моделі експоненційного або степеневого виду.

У першій моделі використано експоненційну функцію типу:

$$PCI = PCI_0 \cdot e^{-kt}, \quad (1)$$

Така функція дає увігнуту криву яка показує швидке падіння на початку та поступове сповільнення деградації, що характерне для зміни деформативності дорожнього покриття.

Таблиця 4 – Ефективність ремонтів (цементобетонні покриття РСС)

Table 4 – Repair efficiency (PCC cement concrete coatings)

Метод ремонту (Treatment)	Діапазон PCI до ремонту	Зміна PCI після ремонту	Строк служби, роки (мін–сер–макс)	Орієнтовна вартість, \$/м ²	Ефективність (В/С)
Joint Resealing	65–90	+5...+10	5 – 7 – 10	3–7	3–5
Partial-Depth Repair (PDR)	45–75	+15...+25	10 – 12 – 15	40–80	2–4
Full-Depth Repair (FDR)	30–60	+25...+40	15 – 20 – 25	150–300	1,5–3
Diamond Grinding	50–80	+10...+20 (та ↓IRI 40–60%)	8 – 10 – 15	20–40	3–6
Dowel Bar Retrofit (DBR)	40–70	+15...+30	10 – 15 – 20	40–90	2–5

На рис. 4 побудовано графік кривої деградації РСС з та без шару зношування.

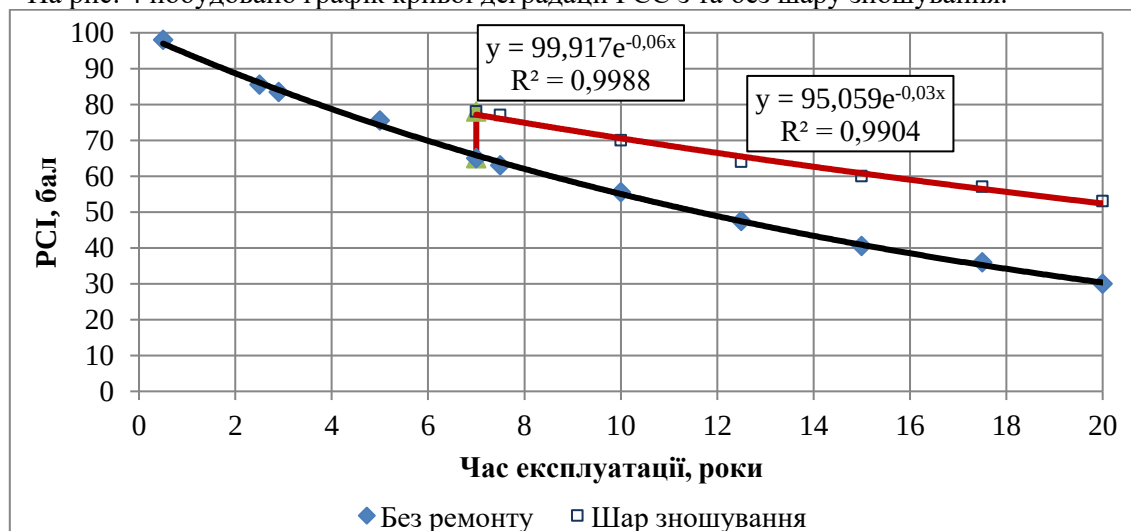


Рисунок 4 – Криві деградації РСС за моделлю 1: нижня крива — деградація без втручання; верхня крива — влаштування шару зношування на 7-му році (приріст PCI $\approx +10$ та зменшення швидкості деградації)

Figure 4 – PCC degradation curves according to model 1: lower curve – degradation without intervention; upper curve – installation of a wear layer at year 7 (PCI increase $\approx +10$ and decrease in degradation rate)

Однак у більшості публікацій (у тому числі у матеріалах FHWA та схемі деградації для втоми застосовується степенева модель:

$$PCI = PCI_0 - a \cdot t^b, \quad b > 1, \quad (2)$$

Така залежність формує випуклу криву, яка має повільну деградацію на початку та різке прискорення після досягнення “критичної зони”; катастрофічне зростання витрат після $PCI \approx 50-60$.

Саме така форма відповідає реальній поведінці жорстких покриттів при врахуванні явища втоми. Графік зміни деградації покриття (рис. 5) показує: для зміни балу бетонного покриття без ремонту — випукла крива, з прискоренням руйнування після 8–10 років. При влаштуванні тонкошарового покриття Сларрі Сіл (на 7 рік) спостерігається приріст $\approx +8$ балу PCI, зменшення швидкості деградації незначне, а продовження служби становить $\approx 3-4$ роки.

При влаштуванні мікропокриття (те ж на 7 рік) приріст становить $\approx +15$ PCI, спостерігається суттєвіше зменшення темпу деградації, а подовження терміну служби $\approx 5-7$ років. Для цементобетонних покриттів (РСС): ефект шару зносу проявляється не тільки у “вертикальному піднятті” PCI, а й у зміні похідної деградації (зменшенні темпу зносу).

Саме ця зміна похідної формує економічний ефект в довготривалій перспективі за 40 років експлуатації (LCCA).

Висновки. Шари зношування є ефективним засобом продовження терміну служби цементобетонних покриттів. Найбільш ефективними є мікропокриття та тонкошарові покриття. Превентивні ремонти забезпечують значне зниження витрат життєвого циклу. Ефективність залежить від стану покриття та якості виконання робіт. Необхідне вдосконалення нормативної бази України з урахуванням міжнародного досвіду. Впровадження сучасних технологій забезпечить підвищення довговічності дорожньої мережі.

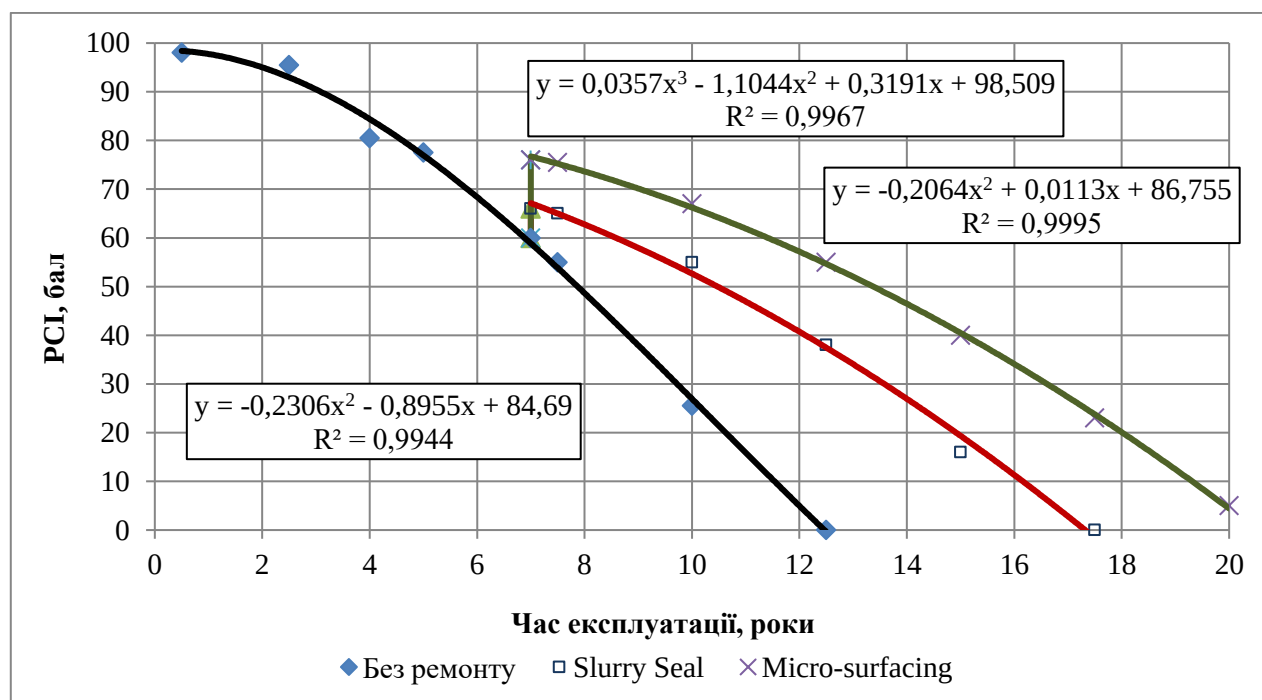


Рисунок 5 – Криві деградації РСС за моделлю 2
Figure 5 – PCC degradation curves according to model 2

У 2025–2026 роках проведено випробування холодного високощербеного асфальтобетону Road Pave у Київській області. Суміш укладалася шаром 15 мм за температури повітря $+10^\circ\text{C}$ на вологий бетонний покриття. Через два тижні експлуатації стан ділянки оцінено як відмінний, вильоту щебеню не зафіксовано. Це підтверджує можливість використання холодних технологій для оперативного захисту бетонних плит.

Основні фактори ефективності: технічний стан покриття; інтенсивність руху; кліматичні умови; якість матеріалів та технологія виконання робіт. Економічна ефективність застосування шарів зношування полягає у зменшенні витрат на 35–45%; відтермінуванні капітального ремонту від 2 – 4 до 10 – 15 років; підвищенні ефективності використання обмежених ресурсів.

Наукова новизна полягає у встановленні залежності ефективності шарів зношування від: стану покриття; типу технології; складу суміші. Обґрунтовано доцільність застосування мікропокривів як оптимального рішення для цементобетонних покриттів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні використанні при розробленні нормативних документів; у практиці експлуатації автомобільних доріг та при плануванні ремонтних заходів в системі СУСП чи HDM.

Найбільш перспективним напрямом для України є розробка складів холодних сумішей із підвищеною адгезією, уточнення вимог ДСТУ щодо поверхневих обробок, розріджених бітумів, холодних асфальтобетонних сумішей, превентивного утримання ЦБП та підготовка кваліфікованих кадрів фахівців - дорожників здатних відповідати рівню сучасних технологій.

Перелік посилань

1. Asphalt Institute. MS-17 Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation. Lexington: Asphalt Institute, 2014.- 152 p.
2. AASHTO. Pavement Management Guide. 2nd ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012. - 263 p.
3. ASTM D-2995-23. Standard Practice for Estimating Application Rate and Residual Application Rate of Bituminous Distributors, 2023. DOI: 10.1520/D2995-23
4. ATS 3550 Diamond Grinding of Concrete Pavement / Austroads Test Methods. – Sydney: Austroads, 2019. – 22 с. URL: <https://austroads.com.au/publications/test-methods/ats-3550>.
5. ACPA. Thin Concrete Overlays for Pavement Preservation. Skokie: American Concrete Pavement Association, 2014.- 48 p.
6. Concrete Pavement Preservation Guide. – Washington: Federal Highway Administration, 2014. – 64 с. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif14004.pdf>.
7. Concrete Pavement Preservation, Maintenance and Rectification. – Sydney: Concrete Pavements Australia, 2022. – 30 с. URL: <https://concretepavements.com.au/wp-content/uploads/2022/10/Pavement-Note-004-Concrete-Pavement-Preservation-Maintenance-and-Rectific>.
8. Concrete Pavements for Low Noise Performance that Lasts. – Brussels: EUPAVE, 2016. – 16 с. URL: <https://www.eupave.eu/wp-content/uploads/eupave-leaflet-low-noise-concrete-pavements.pdf>.
9. Diamond Grinding of Concrete Pavements. – Washington: Federal Highway Administration. – 24 с. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/diamond.pdf>.
10. EN 12271:2006. Surface dressing — Requirements. Brussels: European Committee for Standardization, 2006. 34 p..
11. EN 12273:2008. Slurry surfacing — Requirements. Brussels: European Committee for Standardization, 2008. 30 p.
12. Guide to Concrete Road Pavements (BP64). – Brussels: EUPAVE; BRITPAVE, 2014. – 52 с. URL: <https://www.eupave.eu/wp-content/uploads/BP64-Guide-to-Concrete-Road-Pavements-BRITPAVE.pdf>.
13. Harrington D., Fick G. Guide to Concrete Overlays. 3rd ed. Skokie: American Concrete Pavement Association, 2014.- 196 p.
14. International Slurry Surfacing Association (ISSA). Slurry Seal Handbook. Revised edition. Annapolis, 2010. 312 p.
15. Next Generation Concrete Surface White Paper / American Concrete Pavement Association. – Washington: ACPA, 2017. – 28 с. URL: https://www.acpa.org/wp-content/uploads/2019/02/Celebrating_Next_Generation_Concrete_Surfaces_White_Paper.pdf.

16. Ergun, Murat & Iyınam, Sukriye & Iyınam, A.. (2005). Prediction of Road Surface Friction Coefficient Using Only Macro and Microtexture Measurements. Journal of Transportation Engineering 2005-04-01 131(4): 311-319. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:4\(311\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:4(311))
17. FHWA. Guide for Concrete Overlays of Asphalt Pavements. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2017.- 132 p.
18. FHWA. Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2016.- 84 p.
19. FHWA. Pavement Preservation Compendium II. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2018.- 146 p.
20. ISSA A165. Recommended performance guideline for Chip Seal. 2022, p. 9. https://org-ppra-prod.s3.amazonaws.com/uploads/treatment_file/upload/36/A165_Recommended_Performance_Guideline_for_Chip_Seal.pdf
21. NCHRP. Synthesis 460: Thin and Ultra-Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation. Washington, DC: Transportation Research Board, 2014.- 118 p.
22. PIARC. Road Surface Characteristics and Surface Treatments. Paris: World Road Association, 2019. 92 p.
23. PIARC. Pavement Preservation Techniques. Paris: World Road Association, 2019. 96 p.
24. Thin Concrete Overlays Technical Brief. – Washington: Federal Highway Administration. – 12 с. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif17012.pdf>
25. Microsurfacing Association. Microsurfacing — A Proven Surface Treatment. Washington, DC, 2021. 24 p.
26. Гамеляк І.П. *Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу*. НТУ. 2005. 428 с.
27. Гамеляк І. П., Журавський Д. Д. Шляхи відновлення та збереження автомобільних доріг в умовах обмеженого фінансування. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2025. Вип. 118. Ч. 1. С. 35–47. DOI: 10.33744/0365-8171-2025-118.1-035-047. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.1/35.pdf
28. ДБН 2.3.-4 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина 2. Будівництво. https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=96760
29. ТК 37641918/03450778-145:2012 Типова технологічна карта на влаштування одиночної поверхневої обробки з одним розсіпом щебеню з застосуванням укладальної дорожньої колони SCHAFER Road-Master 4000.
30. ТК 37641918/03450778-135:2012 Типова технологічна карта на влаштування одиночної поверхневої обробки з двома розсіпами щебеню з застосуванням бітумошебенерозподільовача Patchmatic R-2.
31. Р В.3.2-218-03449261-728:2008. Рекомендації по застосуванню тонкошарових покриттів при поточному ремонті автомобільних доріг. https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=46643
32. СОУ 45.2-00018112-036:2009 Бітуми та бітумополімери рідкі. Технічні умови.

EFFICIENCY OF RESTORATION OF CEMENT CONCRETE PAVEMENTS USING WEARING COURSES

Igor Pavlovych Gameliak, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of "System Design of Transport Infrastructure and Geodesy", National Transport University. Kyiv, Ukraine, e-mail: gip65n@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-9246-7561>

Demyan Leonardovich Zhuravskiy, chief of laboratory, ShRBU N100 (Kyiv, Ukraine), kievizol@ukr.net

Summary. The paper presents the results of research on the efficiency of restoring the performance characteristics of cement concrete pavements using wearing courses. International and national experience in

the application of thin and ultra-thin layers is analyzed. The effectiveness of technologies such as microsurfacing, slurry seal, and thin asphalt layers is evaluated. The economic and operational advantages of preventive maintenance are substantiated.

In 2025–2026, a test of cold high-crushed asphalt concrete Road Pave was conducted in the Kyiv region. The mixture was laid in a layer of 15 mm at an air temperature of +10°C on a wet concrete surface. After two weeks of operation, the condition of the site was assessed as excellent, no crushed stone was recorded. This confirms the possibility of using cold technologies for the operational protection of concrete slabs.

The main efficiency factors: technical condition of the surface; traffic intensity; climatic conditions; quality of materials and technology of work. The economic efficiency of using wearing layers consists in reducing costs by 35–45%; postponing major repairs from 2–4 to 10–15 years; increasing the efficiency of using limited resources.

The scientific novelty lies in the established dependence of the efficiency of wearing layers on: the condition of the surface; type of technology; composition of the mixture. The feasibility of using micro-covers as an optimal solution for cement concrete surfaces is substantiated.

The practical significance of the results obtained lies in the use used in the development of regulatory documents; in the practice of operating highways and in planning repair measures in the SUSP or HDM system.

The most promising direction for Ukraine is the development of cold mix compositions with increased adhesion, clarification of DSTU requirements for surface treatments, diluted bitumen, cold asphalt concrete mixtures, preventive maintenance of CCP and training of qualified personnel of road workers capable of meeting the level of modern technologies.

Keywords: cement concrete pavement, wearing course, microsurfacing, efficiency, durability.

References

1. Asphalt Institute. MS-17 Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation. Lexington: Asphalt Institute, 2014.- 152 p.
2. AASHTO. Pavement Management Guide. 2nd ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012. - 263 p.
3. ASTM D-2995-23. Standard Practice for Estimating Application Rate and Residual Application Rate of Bituminous Distributors, 2023. DOI: 10.1520/D2995-23
4. ATS 3550 Diamond Grinding of Concrete Pavement / Austroads Test Methods. – Sydney: Austroads, 2019. – 22 c. URL: <https://austroads.com.au/publications/test-methods/ats-3550>.
5. ACPA. Thin Concrete Overlays for Pavement Preservation. Skokie: American Concrete Pavement Association, 2014.- 48 p.
6. Concrete Pavement Preservation Guide. – Washington: Federal Highway Administration, 2014. – 64 c. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif14004.pdf>.
7. Concrete Pavement Preservation, Maintenance and Rectification. – Sydney: Concrete Pavements Australia, 2022. – 30 c. URL: <https://concretepavements.com.au/wp-content/uploads/2022/10/Pavement-Note-004-Concrete-Pavement-Preservation-Maintenance-and-Rectific>.
8. Concrete Pavements for Low Noise Performance that Lasts. – Brussels: EUPAVE, 2016. – 16 c. URL: <https://www.eupave.eu/wp-content/uploads/eupave-leaflet-low-noise-concrete-pavements.pdf>.
9. Diamond Grinding of Concrete Pavements. – Washington: Federal Highway Administration. – 24 c. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/diamond.pdf>.
10. EN 12271:2006. Surface dressing — Requirements. Brussels: European Committee for Standardization, 2006. 34 p..
11. EN 12273:2008. Slurry surfacing — Requirements. Brussels: European Committee for Standardization, 2008. 30 p.
12. Guide to Concrete Road Pavements (BP64). – Brussels: EUPAVE; BRITPAVE, 2014. – 52 c. URL: <https://www.eupave.eu/wp-content/uploads/BP64-Guide-to-Concrete-Road-Pavements-BRITPAVE.pdf>.

13. Harrington D., Fick G. Guide to Concrete Overlays. 3rd ed. Skokie: American Concrete Pavement Association, 2014.- 196 p.
14. International Slurry Surfacing Association (ISSA). Slurry Seal Handbook. Revised edition. Annapolis, 2010. 312 p.
15. Next Generation Concrete Surface White Paper / American Concrete Pavement Association. – Washington: ACPA, 2017. – 28 с. URL: https://www.acpa.org/wp-content/uploads/2019/02/Celebrating_Next_Generation_Concrete_Surfaces_White_Paper.pdf.
16. Ergun, Murat & Iyınam, Sukriye & Iyınam, A.. (2005). Prediction of Road Surface Friction Coefficient Using Only Macro and Microtexture Measurements. Journal of Transportation Engineering 2005-04-01 131(4): 311-319. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:4\(311\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:4(311))
17. FHWA. Guide for Concrete Overlays of Asphalt Pavements. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2017.- 132 p.
18. FHWA. Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2016.- 84 p.
19. FHWA. Pavement Preservation Compendium II. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2018.- 146 p.
20. ISSA A165. Recommended performance guideline for Chip Seal. 2022, p. 9. https://prod.s3.amazonaws.com/uploads/treatment_file/upload/36/A165_Recommended_Performance_Guideline_for_Chip_Seal.pdf
21. NCHRP. Synthesis 460: Thin and Ultra-Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation. Washington, DC: Transportation Research Board, 2014.- 118 p.
22. PIARC. Road Surface Characteristics and Surface Treatments. Paris: World Road Association, 2019. 92 p.
23. PIARC. Pavement Preservation Techniques. Paris: World Road Association, 2019. 96 p.
24. Thin Concrete Overlays Technical Brief. – Washington: Federal Highway Administration. – 12 с. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif17012.pdf>
25. Microsurfacing Association. Microsurfacing — A Proven Surface Treatment. Washington, DC, 2021. 24 p.
22. Gameliak I.P. *Osnovy zabezpechennia nadiinosti konstruksii dorozhnoho odiahu*. NTU. 2005. 428 s. [in Ukrainian]
27. Gameliak I. P., Zhuravskiy D. D. Shliakhy vidnovlennia ta zberezhenia avtomobilnykh dorih v umovakh obmezhenoho finansuvannia. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*. 2025. Vyp. 118. Ch. 1. S. 35–47. DOI: 10.33744/0365-8171-2025-118.1-035-047. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/118.1/35.pdf [in Ukrainian]
28. DBN 2.3.-4 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna 2. Budivnytstvo. https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=96760 [in Ukrainian]
29. TK 37641918/03450778-145:2012 Typova tekhnolohichna karta na vlashtuvannia odynochnoi poverkhnevoi obrobky z odnym rozsygom shchebeniu z zastosuvanniam ukladalnoi dorozhnoi kolony SCHAFFER Road-Master 4000. Diiuchy. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54802 [in Ukrainian]
30. TK 37641918/03450778-135:2012 Typova tekhnolohichna karta na vlashtuvannia odynochnoi poverkhnevoi obrobky z dvoma rozsygamy shchebeniu z zastosuvanniam bitumoshchebenerozpodiliuvacha Patchmatic R-2. Diiuchy. [in Ukrainian]
31. R V.3.2-218-03449261-728:2008. Rekomendatsii po zastosuvanniu tonkosharovykh pokryttiv pry potochnomu remonti avtomobilnykh dorih. Diiuchy. Data pryiniattia: 03.12.2008. https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=46643 [in Ukrainian]
32. SOU 45.2-00018112-036:2009 Bitumy ta bitumopolimery ridki. Tekhnichni umovy. [in Ukrainian]

Дата надходження до редакції 05.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 01.02.2026.

УДК 625.7/.8:656.13
UDC 625.7/.8:656.13

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-213-222

ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ТРИЛАНКОВИХ АВТОПОЇЗДІВ ІЗ ЗАГАЛЬНОЮ ДОВЖИНОЮ ПОНАД 25 М У МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

EXPERIENCE IN THE USE OF THREE-LINK TRAINS WITH A TOTAL LENGTH OF MORE THAN 25 M IN INTERNATIONAL FREIGHT TRANSPORT



Ілляш Сергій Іванович, кандидат технічних наук, начальник Центру досліджень розвитку та утримання об'єктів інфраструктури Державного підприємства «Національний інститут розвитку інфраструктури», Київ, Україна,
імейл: illiash.s@ukr.net, тел.: +380679432533,
<https://orcid.org/0000-0002-3001-8012>



Зеленовський Володимир Анатолійович, доктор філософії, завідувач відділу технологій Центру досліджень розвитку та утримання об'єктів інфраструктури Державного підприємства «Національний інститут розвитку інфраструктури», Київ, Україна,
імейл: ukrdorndi@ukr.net, тел.: +380637727292,
<https://orcid.org/0000-0001-5834-5456>



Райковський Віталій Францевич, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник відділу технологій Центру досліджень розвитку та утримання об'єктів інфраструктури Державного підприємства «Національний інститут розвитку інфраструктури», Київ, Україна,
імейл: vintikntu@ukr.net, тел.: +380982846899,
<https://orcid.org/0000-0002-6391-7647>

Анотація. У статті наведено аналіз міжнародного досвіду застосування триланкових автопоїздів із загальною довжиною понад 25 м у сфері автомобільних вантажних перевезень. Розглянуто основні техніко-експлуатаційні характеристики таких транспортних засобів, умови їх використання, а також нормативно-правові та інфраструктурні обмеження, що діють у різних країнах. Проаналізовано підходи до регулювання руху триланкових автопоїздів у країнах Європейського Союзу, Скандинавії, Австралії тощо, з урахуванням вимог до габаритно-вагових параметрів, маршрутів руху, безпеки дорожнього руху та впливу на транспортну інфраструктуру. Визначено потенційні переваги застосування автопоїздів такої довжини з точки зору підвищення ефективності перевезень, зниження транспортних витрат і екологічного впливу, а також висвітлено застереження щодо можливих ризиків та обмежень. Отримані результати аналізу можуть бути використані для обґрунтування доцільності подальшого впровадження триланкових автопоїздів у практику міжнародних та внутрішніх вантажних перевезень, зокрема в умовах адаптації національної дорожньої інфраструктури і нормативної бази.

Ключові слова. Триланковий автопоїзд, автопоїзд понад 25 м, LHV, EuroCombi, міжнародні вантажні перевезення, внутрішні вантажні перевезення, габаритно-вагові параметри, транспортна інфраструктура, безпека дорожнього руху.

Вступ. Через стабільне підвищення конкуренції на ринку транспортних послуг за останні десятиліття спостерігається стійке зростання обсягів автомобільних вантажних перевезень, що супроводжується підвищенням рівня завантаження транспортних засобів а також інтенсивності їх руху. Ураховуючи такі умови застосовані перевантажені транспортні засоби значно впливають на строк експлуатування як конструкцій дорожнього одягу автомобільних доріг так і на транспортні споруди, що зумовлює потребу пошуку більш ефективних і водночас інфраструктурно збалансованих рішень у сфері перевезень.

Одним із таких рішень є застосування триланкових автопоїздів із загальною довжиною понад 25 м, відомих у міжнародній практиці як LHV (Longer and Heavier Vehicles) або EuroCombi. Використання таких транспортних засобів дозволяє збільшити обсяг вантажу, що перевозиться за один рейс, зменшити кількість поїздок і знизити питомі витрати пального та викиди забруднювальних речовин у розрахунку на одиницю перевезеного вантажу. Водночас їх упровадження потребує ретельного оцінювання впливу на дорожній одяг автомобільних доріг, транспортні споруди та безпеку дорожнього руху.

Під час аналізування технічних параметрів автопоїздів типу EuroCombi використовувався міжнародний досвід, зокрема результати досліджень [1] та [2], у яких розглянуто питання взаємодії LHV з наявною дорожньою інфраструктурою та оцінено їх вплив на довговічність дорожнього покриття і транспортних споруд.

У багатьох країнах триланкові автопоїзди вже застосовуються в міжнародних вантажних перевезеннях за спеціально визначених умов і маршрутів. Для України аналіз такого досвіду є актуальним у контексті розвитку міжнародних транспортних коридорів та адаптації національної дорожньої інфраструктури і нормативної бази до сучасних вимог вантажних перевезень.

Матеріали та методи. Методологічною основою дослідження є системний науковий підхід до аналізування досвіду застосування триланкових автопоїздів із загальною довжиною понад 25 м.

У роботі використано методи порівняльного аналізу, узагальнення, формально-логічний та статистичний методи дослідження. Матеріалами для дослідження слугували результати наукових і прикладних досліджень міжнародних організацій, звіти транспортних відомств різних країн, а також чинні нормативно-правові документи, що регламентують габаритно-вагові параметри та умови експлуатування автопоїздів підвищеної довжини. Окрему увагу приділено аналізуванню вимог Директиви Ради 96/53/ЄС [3] та практиці її застосування у країнах Європейського Союзу.

У межах дослідження виконано порівняльний аналіз допустимих параметрів триланкових автопоїздів, умов їх руху, а також інфраструктурних обмежень, що дозволило сформувати узагальнену картину міжнародного досвіду та визначити ключові чинники, які мають бути враховані під час можливого впровадження таких транспортних засобів у практику міжнародних вантажних перевезень.

Виклад основного матеріалу.

Стійке зростання обсягів автомобільних вантажних перевезень (за останні (15 – 20) років у ЄС на (50 – 65) %, в Україні на (35 – 40) %) зумовлює підвищену увагу до ефективності використання транспортних засобів та їх впливу на транспортну інфраструктуру. У цьому контексті триланкові автопоїзди із загальною довжиною понад 25 м, відомі як LHV або EuroCombi, які передбачені Директивою Ради 96/53/ЄС [3] із встановленими максимально дозволеними розмірами і вагою для внутрішніх і міжнародних перевезень, розглядаються як один із інструментів підвищення продуктивності автомобільного транспорту. За рахунок збільшення вантажомісткості такі автопоїзди дозволяють перевозити більший обсяг вантажу за один рейс, що призводить до зменшення кількості транспортних операцій, скорочення витрат на перевезення та зниження питомих викидів шкідливих речовин.

Із 1997 року LHV законодавчо дозволені для внутрішніх перевезень у Нідерландах, Німеччині та у країнах Скандинавії. У більшості країн ЄС довжина автопоїздів обмежена значенням 18,75 м для звичайних автопоїздів і 16,5 м для напівпричепів, проте деякі країни дозволяють використання довших автопоїздів у рамках пілотних програм або за спеціальними дозволами [4 – 11].

З 2012 року дослідження щодо ефективності і безпеки руху LHV фінансуються урядовими установами в низці країн ЄС для оцінювання доцільності їх впровадження для внутрішніх і міжнародних перевезень. Європейська Комісія також проводить дослідження наслідків використання більш довших і важких транспортних засобів для автомобільних вантажних перевезень (довжиною понад 25 м і вагою до 60 т), для всієї транспортної системи Європейського Союзу. Такі вантажівки вже знаходяться в обігу також у Фінляндії та Швеції, тоді як інші держави-члени Європейського Союзу лише розглядають можливість їх впровадження.

За результатами попереднього аналізу досвіду використання LHV визначено, що потенційні наслідки впровадження LHV в Україні можуть бути позитивними як в економічному, так і в екологічному плані. Збільшення корисної навантаги на транспортний засіб зменшить транспортні витрати та призведе до значної економії для операторів, промисловості та споживачів, а оскільки для перевезення такого ж обсягу вантажу знадобиться менше вантажівок, екологічні та інші зовнішні витрати на вантажні перевезення також будуть нижчими, навіть якщо окремий LHV споживає пального та забруднює довкілля більше ніж звичайна вантажівка.

Особливості руху автопоїздів в Україні

В Україні вимоги до проїзду автопоїздів довжиною понад 25 метрів установлено Правилами дорожнього руху України [12], Законом України «Про автомобільні дороги» [13], Постановою Кабінету Міністрів України «Про проїзд великогабаритних та великовагових транспортних засобів автомобільними дорогами, вулицями та залізничними переїздами» [14], а також іншими технічними регламентами, що стосуються вантажних перевезень.

Відповідно до Правил дорожнього руху України вантажні автопоїзди та транспортні засоби з нестандартними габаритами підлягають спеціальному регулюванню, а саме:

- максимальна довжина транспортного засобу – для автопоїздів понад 22 м потрібно отримати спеціальний дозвіл для проїзду дорогами загального користування;
- осьові навантаги – для вантажівок з кількістю осей більше ніж дві, максимальні осьові навантаги варіюються від 7 т до 11,5 т на кожен вісь, залежно від категорії дороги та пори року. У разі перевищення допустимих навантажень потрібно отримати спеціальний дозвіл;
- швидкісні обмеження – для транспортних засобів вагою понад 12 т максимальна швидкість руху обмежена до 80 км/год на дорогах загального користування, а на автомагістралях – до 90 км/год;
- режими руху та вимоги до маршрутів – автопоїзди з загальною довжиною понад 22 м можуть рухатися тільки за погодженими маршрутами, з урахуванням стану інфраструктури, стану дорожнього покриття, з урахуванням радіусів поворотів, розворотів та з'їздів на транспортних розв'язках, оскільки вказані транспортні засоби такої довжини мають обмежену маневреність, особливо у міських умовах.

Автопоїзди довжиною понад 25 м відповідно до Закону України «Про автомобільні дороги» повинні мати спеціальний дозвіл від відповідних органів для руху автомобільними дорогами загального користування з метою запобігання руйнуванню дорожнього одягу.

Маршрути руху для таких автопоїздів повинні враховувати габарити (геометрію) доріг, мостів, тунелів та інших об'єктів інфраструктури.

В Україні також враховуються міжнародні стандарти і правила щодо вантажних перевезень, зокрема вимоги Європейського Союзу, адже Україна є учасником міжнародних транспортних угод. Наприклад, вимоги до Європейської конференції міністрів транспорту (European Conference of Ministers of Transport (ECMT)) стосуються автопоїздів довжиною більше 25 м, включаючи технічні вимоги до їх конструкції, безпеки та впливу на інфраструктуру.

Для безпечного руху автопоїздів понад 25 м необхідна спеціалізована дорожня інфраструктура: посилені мости, забезпечені відповідні радіуси поворотів і ширина доріг.

Важливим елементом є ваговий контроль на дорогах, який дозволяє запобігти руйнуванню дорожнього одягу та аварійним ситуаціям через надмірні навантаги на осі.

Особливості використання LHV в Австралії

Австралія добре відома своїми довгими і важкими вантажівками (автопоїздами) як у світовому транспортному секторі, так і за його межами. Що не так добре відомо, так це те, що ця величезна країна – фактично континент впродовж тривалого часу була довгий час в авангарді розробки необхідної законодавчої, нормативної і технічної бази для впровадження LHV.

В Австралії на початку 2000-х років було визнано, що:

- інноваційні технології транспортних засобів будуть потрібні для задоволення зростаючого попиту на дорожній простір з огляду на посилення обмежень дорожньої інфраструктури (і бюджетів, спрямованих на поліпшення дорожньої інфраструктури);
- інноваційний дизайн / компоновання транспортних засобів дозволяє LHV рухатися на певних ділянках дорожньої мережі, які вважатимуть придатними для використання таких транспортних засобів;
- звичні методи управління маршрутами та дотриманням вагових норм не здатні впоратися з ризиками для безпеки та управління інфраструктурою, пов'язаними з інноваційними транспортними засобами, а саме дозволені до експлуатації лише на окремих ділянках мережі автомобільних доріг, тому було впроваджено програму інтелектуального доступу (Intelligent Access Program (IAP)).

IAP було затверджено у 2005 році відповідно до Модельного законодавства про IAP Австралійською транспортною радою. Через рік було створено Транспортну сертифікацію Австралії (TCA) як національну компанію для впровадження та адміністрування IAP, першої програми в рамках Національної системи. Цей процес у рамках Програми IAP призвів до створення Національного закону про важкі транспортні засоби (2014 р.).

Додаток IAP використовує GPS та інші технології для відстеження транспортних засобів-учасників і забезпечення дотримання ними умов експлуатації, таких як маршрут, швидкість і дотримання часових обмежень. Нещодавно було запроваджено контроль за дотриманням габаритно-вагових параметрів транспортних засобів.

За допомогою програми IAP можна вирішити два широкі завдання. По-перше, покращити відповідність умовам, характерним для регіону, що в деяких випадках було б недопустимим, по-друге, з огляду на покращену цілісність і точність, здатність з упевненістю використовувати традиційні конструкції, які мають місце в деяких інфраструктурних мережах.

Особливості використання LHV у Швеції

Історично склалося так, що Швеція дозволила рух великогабаритних транспортних засобів на своїй мережі автомобільних доріг. Перехід від 24-метрових до 25,25 м і 60 т вантажівок у 1998 році мав на меті використати переваги нового підходу ЄС до автомобільного транспорту, який був включений в Директиву 96/53/ЄС. Цей новий підхід був розроблений, коли Швеція і Фінляндія приєдналися до ЄС у 1995 році. З екологічних та конкурентних міркувань, як для Швеції, так і для Фінляндії було неприйнятним застосування правил ЄС щодо вагових та габаритних параметрів, оскільки в обох країнах було дозволено ввезення транспортних засобів, які були довгими та важкими, ніж це встановлено вимогами ЄС – 18,75 м / (40 – 44) т. Для того, щоб знайти рішення, яке б дозволило іноземним перевізникам конкурувати на рівних умовах створено European Modular System (EMS), яка дає можливість збільшувати довжину і вагу своїх транспортних засобів за умови використання наявних стандартизованих модулів.

У 2007 році за ініціативи лісової галузі розпочався пілотний проєкт з використання нової комбінації транспортних засобів довжиною 32 м і масою 90 т, що дозволило «вкласти одну палету в одну машину» і 90 т, що дозволило перевозити деревину «на один штабель більше».

У 2010 році Шведська транспортна адміністрація ініціювала обговорення в групі зацікавлених сторін з метою сформувати більш комплексний підхід до багатьох ідей і пропозицій стосовно LHV. Навесні і влітку 2011 року був представлений перший проєкт програми досліджень і розробок у сфері транспорту великої вантажопідйомності. Термін «великовагові перевезення» замість «великоваговий

транспортний засіб» вказує на прагнення запустити концепцію з широкою перспективою, що охоплює всю транспортну систему.

У 2011 році група політиків здійснила навчальну поїздку до Австралії, яка поклала початок тісній співпраці з ТСА. У цьому ж році було створено новий шведський інститут досліджень та інновацій у сфері транспортної ефективності «Closer».

Протягом 2018 року було оновлено дорожню карту з LHV до 2030 року (Asp, Akesson and Wandel, 2019 [24]). Результатом є більш високі амбіції як щодо цілей, так і щодо заходів. Щодо викидів CO₂, наприклад, нова мета полягає в тому, щоб скоротити викиди на рівні системи на 15 % лише за рахунок масового впровадження високоефективних транспортних засобів (максимальна довжина – 34,5 м і загальна вага – 74 т). До 2030 року на частку великовагових перевезень має припадати 80 % від усіх вантажів, перевезених дорогами Швеції, що вимагає, щоб майже всі тягачі, причепа, напівпричепа та візки були схвалені для використання з загальними параметрами автопоїзда 34,5 м / 74 т.

Наразі дозволено використання автопоїздів довжиною до 25,25 м і навіть більше (до 32 м у деяких випадках). Це зумовлено особливостями національної транспортної політики, спрямованої на підвищення ефективності перевезень і зменшення впливу на довкілля.

Особливості використання LHV у Фінляндії

Країна, яка має багато практичних і правових схожостей зі Швецією, зокрема, велику лісову промисловість. На основі шведських прикладів, власних досліджень і невеликих пілотних проєктів вони вирішили збільшити загальну вагу з 60 т до 76 т без спеціальних обмежень. Це нове правило було схвалено Європейським Союзом і введено в дію з осені 2013 року. З того часу фінські транспортні агентства продовжують нові випробування LHV. На основі результатів цих випробувань навесні 2018 року було прийнято нове законодавче рішення, що дозволяє довші транспортні засоби до 34,5 м, яке було схвалено Європейським Союзом і набуло чинності з січня 2019 року. Випробування з більш важкими транспортними засобами до 88 т тривають.

Особливості використання LHV у Нідерландах

LHV поступово впроваджують в Нідерландах з 2001 року. У період з 2008 по 2011 рік було проведено дослідницький і пілотний проєкт для випробування транспортних засобів довжиною 25,25 м і вагою 60 т на обмеженій частині мережі доріг загального користування. Результати виявилися позитивними, і з 2013 LHV дозволені на частині мережі доріг загального користування за умови отримання спеціальних дозволів.

Особливості використання LHV у Німеччині

У Німеччині Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) провів масштабне дослідження, за результатами якого було зроблено висновок, що LHV не можуть бути адаптовані для застосування в межах міських або приміських районів. Польові випробування LPV були проведені між 2012 та 2016 роками. За результатами дослідження 13 з 16 федеральних земель з січня 2017 року дозволили використання транспортних засобів довжиною 25,25 м з обмеженням до 40 т з метою захисту мостів на дорогах з обмеженим рухом. У грудні 2017 року ще дві федеральні землі наслідували цей приклад, залишивши за межами системи лише місто-конгломерат Берлін.

Особливості використання LHV у Данії

Довгострокова пілотна програма з польовими випробуваннями застосування LHV довжиною 25,25 м і 60 т триває в Данії з 2008 року. До цього часу не було прийнято рішення про перехід від цієї пілотної програми до регулярних правил.

Особливості використання LHV у Іспанії

Застосовують LHV довжиною переважно до 18,75 м, але продовжують проводити пілотні проєкти з використанням автопоїздів до 25,25 м. Використання довших автопоїздів можливе лише за спеціальним дозволом і на певних маршрутах у рамках пілотних програм.

Особливості використання LHV в Бельгії

Максимальна довжина LHV в основному становить до 18,75 м. Ведуться експерименти з використанням автопоїздів довжиною до 25,25 м. Використання довших автопоїздів можливе лише за спеціальним дозволом і на визначених маршрутах.

Особливості використання LHV в Чехії

Максимальна дозволена довжина LHV до 18,75 м. Однак для автопоїздів із загальною довжиною понад 25 м існують спеціальні умови та експериментальні програми, які дозволяють використовувати автопоїзди великих розмірів (так звані «гігантські автопоїзди» або European Modular System (EMS)). Чехія, як член ЄС, бере участь у тестуванні та частковому використанні модульних автопоїздів EMS (до 25,25 м), які можуть використовувати для транспортування контейнерів на далекі відстані між логістичними хабами та портами та для виконання міжнародних перевезень у складі мультимодальних транспортних ланцюгів.

Для LHV із загальною довжиною понад 25 м існують суворі вимоги щодо:

- загальної ваги – не більше 60 т;
- навантага на одиночну вісь – не повинна перевищувати 12 т;
- рух по автомобільних дорогах, які відповідають вимогам щодо маневреності та безпеки.

Використання автопоїздів довжиною понад 25 м у Чехії потребує спеціальних дозволів, які надають на основі аналізування маршруту та умов безпеки руху. В країні виконують суворий контроль за дотриманням вагових та габаритних обмежень, особливо для захисту дорожньої інфраструктури та мостів.

Чехія проводить тестування та експериментальне використання таких автопоїздів для підвищення ефективності перевезень. У рамках проєктів EMS модульні автопоїзди мають на меті оптимізацію вантажопотоків та зниження транспортних витрат.

Особливості використання LHV в Польщі

Максимальна дозволена довжина LHV – до 18,75 м. Однак є можливість використання автопоїздів до 25,25 м на спеціально визначених маршрутах. Використання можливе тільки в рамках пілотних програм або за спеціальним дозволом.

Особливості використання LHV в Австрії

Максимальна дозволена довжина LHV – до 18,75 м для звичайних автопоїздів, але можливі виключення для спеціальних проєктів. Використання довших автопоїздів обмежене і можливе лише за спеціальним дозволом.

Особливості використання LHV у Великобританії

Максимальна дозволена довжина LHV – до 18,75 м для звичайних автопоїздів. У Великобританії наразі немає широкого використання автопоїздів довжиною понад 25 м. Проведення тестів і пілотних проєктів із використанням довших автопоїздів обмежене спеціальними маршрутами.

Особливості використання LHV в Китайській Народній Республіці

Китай перетворився на найбільшу в світі виробничу і глобальну торговельну економіку, а також став країною з найбільшим обсягом автомобільних вантажних перевезень [15 – 21].

У 1989 році був розроблений національний стандарт щодо маси і габаритів транспортних засобів під назвою GB1589-1989, заснований на європейському законодавстві, включаючи основні визначення. Але на той час Китаю все ще не вистачало фізичної інфраструктури та виробничих потужностей для виробництва LHV, які б відповідали його сучасним транспортним потребам.

Після вступу до СОТ на початку 2000-х років Китай розробив програми розбудови власної індустрії вантажних автомобілів та амбітні плани розвитку дорожньої мережі. З різних причин GB1589-1989 так і не було введено в дію, і вже в перший період 2000-х років понаднормоване за масою транспортного засобу стало скоріше нормою, ніж винятком.

На початку 2010-х років сформувалось розуміння того, що китайська модель зростання галузі вантажних перевезень потребує серйозних капітальних вкладень і переходу до більш стійкої моделі розвитку. Нова редакція GB1589 була основана на Директиві ЄС 96/53/ЄС та на Європейській модульній системі (EMS); так було створено Китайську модульну систему (China Modular System (CMS)).

З 2018 року транспортна система розвивається згідно із законодавством. Різні комбінації транспортних засобів на основі CMS зараз проходять випробування в Міністерстві транспорту.

Огляд нормативних обмежень щодо параметрів LHV

Обмеження щодо параметрів LHV можуть змінюватись залежно від національних регламентів і вимог безпеки руху. У багатьох країнах Європи використання таких автопоїздів є частиною експериментальних програм, спрямованих на оцінювання їхнього впливу на інфраструктуру і безпеку руху. У табл. 1 наведено огляд наявних нормативних обмежень щодо параметрів LHV у країнах Європи.

Таблиця 1 – Огляд наявних нормативних обмежень щодо параметрів LHV у країнах Європи
Table 1 – Overview of existing regulatory restrictions on LHV parameters in European countries

Країна	Максимальна довжина автопоїзда, м	Максимальна загальна маса, т	Максимальна кількість осей	Примітки / Додаткові обмеження
Швеція	25,25 (до 32 в окремих випадках)	60-74	до 11	Висота автопоїзда не більше ніж 4,5 м. Використання на певних маршрутах.
Фінляндія	до 34,5	76	до 11	Висота – не більше ніж 4,4 м. Дозволено на певних маршрутах, що адаптовані під велику навантагу
Німеччина	25,25	40-44 (до 60 у певних випадках)	від 8 до 10	Використання дозволено на визначених маршрутах ("Lang-LKW").
Нідерланди	25,25	60	до 8	Використання дозволено на певних маршрутах із відповідною інфраструктурою.
Данія	25,25	60	до 8	Висота – не більше ніж 4 м. Використання дозволено на визначених дорогах.
Чехія	25,25	60	до 8	Висота – не більше ніж 4 м. Використання дозволено на визначених дорогах.
Бельгія	25,25 (як експеримент)	60	до 8	Використання можливе за спеціальним дозволом на певних маршрутах.
Норвегія	25,25	60-68	до 11	Використання дозволено на певних маршрутах. Висота - не більше ніж 4,5 м.
Іспанія	25,25 (пілотні проекти)	40-44	до 8	Використання можливе за спеціальним дозволом і на визначених маршрутах.
Франція	25,25 (пілотні проекти)	40-44	до 8	Використання дозволено лише в рамках пілотних програм на певних маршрутах.
Великобританія	18,75 (загальні обмеження)	44	до 6	Тестові проекти з використанням автопоїздів понад 25 м на обмежених маршрутах.
Польща	25,25 (експериментальні маршрути)	40-60	до 8	Використання можливе за спеціальним дозволом на певних маршрутах.

Висновок. За результатами аналізування міжнародного досвіду застосування триланкових автопоїздів із загальною довжиною понад 25 м встановлено, що такі транспортні засоби є ефективним інструментом підвищення продуктивності автомобільних вантажних перевезень. Їх використання дозволяє збільшити обсяг вантажу, можливого для перевезення за один рейс, скоротити кількість транспортних операцій та зменшити питомі витрати на перевезення, у тому числі витрати пального і викиди забруднювальних речовин у перерахунку на одиницю перевезеного вантажу.

Міжнародна практика свідчить, що за умови дотримання встановлених габаритно-вагових параметрів і рівномірного розподілу навантажень між осями вплив триланкових автопоїздів на дорожній одяг і транспортні споруди може бути порівняний або меншим порівняно з традиційними великоваговими транспортними засобами. Водночас ключовим фактором безпечної експлуатації

таких автопоїздів є обмеження їх руху визначеними маршрутами, придатними за геометричними параметрами та несною здатністю конструкцій дорожнього одягу автомобільних доріг, а також транспортних споруд.

Визначена довжина автопоїздів зумовлює підвищені вимоги до елементів автомобільних доріг, зокрема радіусів поворотів, ширини проїзної частини, параметрів транспортних розв'язок і організування дорожнього руху. Саме тому в більшості країн використання автопоїздів із загальною довжиною понад 25 м здійснюється в межах спеціальних режимів руху, із застосуванням систем моніторингу, обмежень швидкості та підвищених вимог до кваліфікації водіїв.

Досвід країн Європейського Союзу, Скандинавських країн, Австралії тощо підтверджує доцільність поетапного впровадження триланкових автопоїздів через реалізування пілотних проєктів і експериментальних програм. Такий підхід дозволяє обґрунтовано оцінити технічні, економічні та безпекові наслідки їх застосування, адаптувати нормативно-правову базу та визначити перелік автомобільних доріг, придатних для руху автопоїздів підвищеної довжини.

Для України результати проведеного аналізу свідчать про потенційну доцільність застосування триланкових автопоїздів у міжнародних вантажних перевезеннях, насамперед на автомобільних дорогах державного значення та міжнародних транспортних коридорах. Разом із цим впровадження таких транспортних засобів потребує комплексного підходу, що включає оцінювання технічного стану дорожнього одягу і транспортних споруд, удосконалення нормативно-правового регулювання, визначення допустимих маршрутів руху та впровадження ефективних механізмів габаритно-вагового контролю.

Отримані висновки можуть бути використані як науково-методична основа для подальших досліджень, а також під час розроблення рішень щодо можливого впровадження автопоїздів із загальною довжиною понад 25 м у практику міжнародних та внутрішніх вантажних перевезень.

Перелік посилань

1. PIARC. Influence of Heavy Vehicles on Roads and Bridges. 2012.
2. PIARC. Longer and Heavier Vehicles on Roads: Guidelines for Design and Maintenance. 2019.
3. Про встановлення для певних наземних транспортних засобів, що рухаються в межах Співтовариства, максимально дозволених розмірів при національних і міжнародних переміщеннях і максимально дозволеної ваги при міжнародних переміщеннях : Директива Ради 96/53/ЄС від 25.07.1996. [В офіційному перекладі].
4. European Commission. Directive (EU) 2015/719 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic. 2015.
5. European Commission. Study on the regulatory and non-regulatory options to promote the use of longer and heavier vehicles – Final Report. 2017.
6. OECD/ITF. Moving Freight with Better Trucks: Improving Safety, Productivity and Sustainability. International Transport Forum. 2010.
7. Johansson O., Björklund M. Longer and Heavier Vehicles in Sweden and Finland – Effects on Traffic Safety and Infrastructure. *European Transport Research Review*. 2017. Vol. 9, No. 2. P. 17–25.
8. Kreutzberger E. D., Macharis C., Woxenius J. Intermodal versus unimodal road freight transport – A review of comparisons of the external costs. *Transport Reviews*. 2013. Vol. 33, No. 2. P. 255–269.
9. Nijkamp P., Koppelman F. S. Policies for Freight Transport: The Case of Longer and Heavier Vehicles in Europe. *Research in Transportation Economics*. 2012. Vol. 36, No. 1. P. 11–22.
10. Ministry of Transport and Communications Finland. Trial with longer and heavier vehicles in Finland. 2009.

11. Germany Federal Ministry of Transport. Field Trial for Longer Trucks on Selected Routes. 2012.
12. Про Правила дорожнього руху : Постанова Кабінету Міністрів України від 10.10.2001 № 1306. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF>.
13. Про автомобільні дороги : Закон України від 08.09.2005 № 2862-IV. *Законодавство України / Верховна Рада України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2862-15>.
14. Про проїзд великогабаритних та великовагових транспортних засобів автомобільними дорогами, вулицями та залізничними переїздами : Постанова Кабінету Міністрів України від 18.01.2001 № 30 (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ від 26.04.2024 № 457). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/30-2001-%D0%BF>.
15. China Ministry of Transport. Specifications for Dimensions, Axle Load and Mass Limits of Automobiles, Trailers, and Combination Vehicles (GB1589-2016). 2016.
16. Wang H., Yu X., Zhang Z. Research on the Safety Management Policy of Over-length Vehicles in China. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2017. Vol. 17, No. 2. P. 67–74.
17. Zhao J., Liu Y., Wang X. Heavy-duty vehicle regulations and traffic management in China: An overview. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2018. Vol. 5, No. 2. P. 88–95.
18. Liu Z., Wu X. Development and Challenges of China's Freight Transportation and Heavy Vehicle Regulations. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 37. P. 213–221.
19. He K., Wang M., Zhang Y. Policies and Standards for Vehicle Size and Weight Limits in China. *China Transportation Review*. 2017. Vol. 24, No. 3. P. 145–152.
20. China State Council. Regulation on Overloading of Trucks and Trailers (No. 2016/31). 2016.
21. Xiao G., Zhao X. The Development of Super-long Trucks in China: A Policy Review. *International Journal of Transport and Logistics*. 2020. Vol. 5, No. 1. P. 34–40.

EXPERIENCE IN THE USE OF THREE-LINK TRAINS WITH A TOTAL LENGTH OF MORE THAN 25 M IN INTERNATIONAL FREIGHT TRANSPORT

Ilyash Sergey, PhD, Head of the Centre for Research on Infrastructure Development and Maintenance, Kyiv, Ukraine, e-mail: ukrdorndi@ukr.net, tel. +380679432533, <https://orcid.org/0000-0002-3001-8012>

Zelenovskiy Volodymyr, PhD, Head of the Technology Department at the Centre for Infrastructure Development and Maintenance Research at, SE «NIDI», Kyiv, Ukraine, e-mail: ukrdorndi@ukr.net, tel. +380679432533, <https://orcid.org/0000-0001-5834-5456>

Raikovsky Vitalii, PhD Senior Researcher, Technology Department, Centre for Infrastructure Development and Maintenance Research SE «NIDI», Kyiv, Ukraine, e-mail: vintikntu@ukr.net, tel. +380982846899, <https://orcid.org/0000-0002-6391-7647>

Summary. The article analyses international experience in the use of three-axle road trains with a total length of over 25 m in the field of road freight transport. It considers the main technical and operational characteristics of such vehicles, the conditions for their use, as well as the regulatory and infrastructure restrictions in force in different countries. It analyses approaches to regulating the movement of three-unit road trains in the European Union, Scandinavia, Australia, etc., taking into account requirements for dimensions and weight parameters, routes, road safety and the impact on transport infrastructure. The potential advantages of using road trains of this length in terms of increasing transport efficiency, reducing transport costs and environmental impact are identified, and reservations about possible risks and limitations are highlighted. The results of the analysis can be used to justify the feasibility of further introducing three-unit road trains into international and domestic freight transport, particularly in the context of adapting the national road infrastructure and regulatory framework.

Keywords: three-link trains, road train over 25 m, LHV, EuroCombi, international freight transport, domestic freight transport, dimensional and weight parameters, transport infrastructure, road safety.

References

1. PIARC (2012) *Influence of Heavy Vehicles on Roads and Bridges*.
2. PIARC (2019) *Longer and Heavier Vehicles on Roads: Guidelines for Design and Maintenance*.
3. Council Directive 96/53/EC of 25 July 1996 laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic. [In Ukrainian translation].
4. European Commission (2015) Directive (EU) 2015/719 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic.
5. European Commission (2017) *Study on the regulatory and non-regulatory options to promote the use of longer and heavier vehicles – Final Report*.
6. OECD/ITF (2010) *Moving Freight with Better Trucks: Improving Safety, Productivity and Sustainability*. International Transport Forum.
7. Johansson, O. and Björklund, M. (2017) Digitalization of infrastructure: Longer and Heavier Vehicles in Sweden and Finland – Effects on Traffic Safety and Infrastructure. *European Transport Research Review*, 9(2), pp. 17–25.
8. Kreutzberger, E. D., Macharis, C. and Woxenius, J. (2013) Intermodal versus unimodal road freight transport – A review of comparisons of the external costs. *Transport Reviews*, 33(2), pp. 255–269.
9. Nijkamp, P. and Koppelman, F. S. (2012) Policies for Freight Transport: The Case of Longer and Heavier Vehicles in Europe. *Research in Transportation Economics*, 36(1), pp. 11–22.
10. Ministry of Transport and Communications Finland (2009) *Trial with longer and heavier vehicles in Finland*.
11. Germany Federal Ministry of Transport (2012) *Field Trial for Longer Trucks on Selected Routes*.
12. Cabinet of Ministers of Ukraine (2001) Resolution No. 1306 On Road Traffic Rules. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF>. [In Ukrainian].
13. Verkhovna Rada of Ukraine (2005) Law of Ukraine No. 2862-IV On Automobile Roads. *Legislation of Ukraine Database*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2862-15>. [In Ukrainian].
14. Cabinet of Ministers of Ukraine (2001) Resolution No. 30 On the passage of oversized and heavy vehicles on highways, streets and railway crossings (as amended by Resolution No. 457 of 26.04.2024). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/30-2001-%D0%BF>. [In Ukrainian].
15. China Ministry of Transport (2016) *Specifications for Dimensions, Axle Load and Mass Limits of Automobiles, Trailers, and Combination Vehicles (GB1589-2016)*.
16. Wang, H., Yu, X. and Zhang, Z. (2017) Research on the Safety Management Policy of Over-length Vehicles in China. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 17(2), pp. 67–74.
17. Zhao, J., Liu, Y. and Wang, X. (2018) Heavy-duty vehicle regulations and traffic management in China: An overview. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 5(2), pp. 88–95.
18. Liu, Z. and Wu, X. (2019) Development and Challenges of China's Freight Transportation and Heavy Vehicle Regulations. *Transportation Research Procedia*, 37, pp. 213–221.
19. He, K., Wang, M. and Zhang, Y. (2017) Policies and Standards for Vehicle Size and Weight Limits in China. *China Transportation Review*, 24(3), pp. 145–152.
20. China State Council (2016) *Regulation on Overloading of Trucks and Trailers (No. 2016/31)*.
21. Xiao, G. and Zhao, X. (2020) The Development of Super-long Trucks in China: A Policy Review. *International Journal of Transport and Logistics*, 5(1), pp. 34–40.

Дата надходження до редакції 22.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 03.01.2026.

УДК 624.13
UDC 624.13

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-223-229

ДИНАМІКА ДЕПРЕСІЙНОЇ ПОВЕРХНІ У ТІЛІ ГРУНТОВИХ СПОРУД ПІД ЧАС
ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ВОДИ У ВОДОЙМИЩІDYNAMICS OF THE PHREATIC SURFACE IN THE BODY OF EARTH STRUCTURES DURING
DRAWDOWN OF WATER LEVEL IN A RESERVOIR

Кузло Микола Трохимович, доктор технічних наук, професор, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне), завідувач кафедри автомобільних доріг, основ і фундаментів, e-mail: kuzlo-@ukr.net тел. +380966890792

<https://orcid.org/0000-0001-9242-2478>



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

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

Анотація. У статті наведено критерій необхідності врахування гідродинамічних сил від неусталеного фільтраційного потоку у ґрунтових водонасичених укосах при зниженні рівня води у водоймищах з різною інтенсивністю. Отримано залежність для встановлення депресійної поверхні в тілі водонасичених однорідних укосів на будь-який момент часу спорожнення водоймища, рух ґрунтових вод у яких відбувається із нескінченності зі сторони ґрунтового масиву. Встановленні закономірності динаміки депресійної поверхні у водонасичених ґрунтових укосах під час зниження рівня води у водоймищах для двох видів за водопроникністю основ.

Ключові слова: водонасичені ґрунтові укоси, водоймища, депресійна поверхня, гідродинамічні сили, фільтраційний потік.

Вступ. Аналіз стану водонасичених ґрунтових укосів споруд показав, що вибір інженерних заходів з покращення їх роботи у багатьох випадках залежить від режиму і інтенсивності зміни гідрогеологічних умов та дії техногенних факторів [1,2].

При експлуатації ґрунтових споруд в умовах змінного рівня води у водоймищі на надійність, довговічність і безперебійну експлуатацію здатні впливати наступні основні фактори [3]: швидкість зниження рівня води у водоймищі, гідродинамічні сили від неусталеного фільтраційного потоку, геометричні параметри споруди, фільтраційні властивості ґрунту, зміна фізико-механічних властивостей ґрунту тіла і основи споруди у наслідок його водонасичення і осушення тощо.

Значним силовим фактором, що виникає в межах потенційно-нестійкої призми зсуву, є неусталений фільтраційний потік, що обумовлений зміною умов на межі області фільтрації. Його наявність призводить до виникнення гідродинамічних сил, що значно впливають на напружений стан в скелеті ґрунту.

Методи досліджень. Критерієм необхідності врахування гідродинамічних сил від неусталеного фільтраційного потоку при зниженні рівня води у водоймищі згідно із дослідженням Можевітінова А. Л. і Сулейманова І. А [4]є:

$$\alpha = \frac{k}{\mu \cdot V \cdot m}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт фільтрації ґрунту тіла споруди;

V – швидкість зниження рівня води у водоймищі;

μ, m – відповідно, коефіцієнт водовіддачі ґрунту тіла споруди і закладання укосу.

При цьому, критерій α повинен знаходитись у межах:

$$0,05 \leq \alpha \leq 5,0 \quad (2)$$

При $\alpha < 0,05$, можна вважати, що депресійна поверхня в тілі і в укосів споруди не змінюється за час зниження рівня води у водоймищі. Для даного випадку, розрахунки стійкості укосів необхідно вести, як для миттєвого зниження рівня води у водоймищі.

При $\alpha > 5,0$, можна вважати, що депресійна поверхня отримує незначне відставання від рівня води, що понижується у водоймищі. Для даного випадку, можна допустити, що розміщення депресійної поверхні в тілі укосу відповідає рівню води у водоймищі на певний час його спорожнення.

Розміщення депресійної поверхні в тілі і укосі ґрунтової споруди на будь-який момент зниження рівня води у водоймищі можна встановити експериментально, наприклад методом ЕГДА, існуючими аналітичними або чисельними розв'язками.

Для ґрунтових споруд, що влаштовані з однорідного ґрунту (рис. 1), розміщення депресійної поверхні в їх тілі і укосі на будь який моменту часу зниження рівня води у водоймищі можна встановити з використанням залежності В. И. Шестакова [5]:

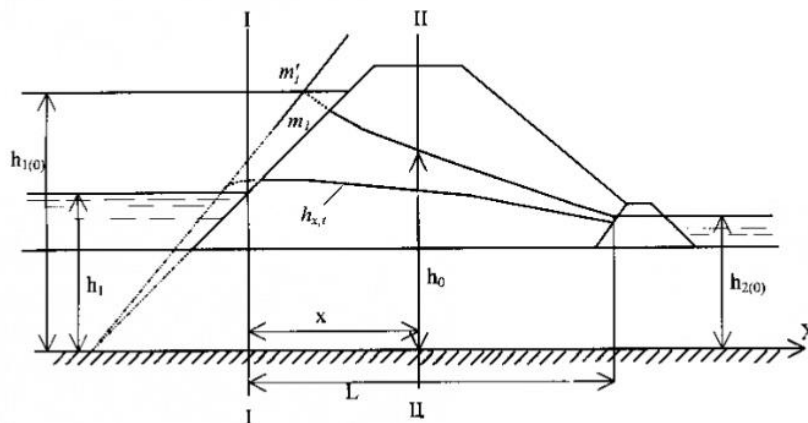


Рисунок 1 – Розрахункова схема з визначення депресійної поверхні в тілі греблі при пониженні рівня води у водоймищі

Figure 1 – Schematic diagram illustrating the determination of the depression surface within the dam body when the water level in the reservoir is lowered

$$h(x,t) = \left\{ \begin{aligned} & h_0^2 - v \cdot t \left[h_{1(0)} + h_1 + \frac{m_1 (h_{1(0)}^2 - h_{2(0)}^2)}{L} \right] \cdot \frac{1}{2} \\ & \cdot \left[F(\lambda, n) - \frac{x + m_1 \cdot vt}{L + m_1 \cdot vt} F(\lambda_L, n) \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де v — середня швидкість зниження рівня води у водоймищі;

$h_1 = h_{1(0)} - vt$ - глибина води у водоймищі під час зниження рівня води;

$F(\lambda, n); F(\lambda_L, n)$ — функції, що визначаються з монограм (рис. 2).

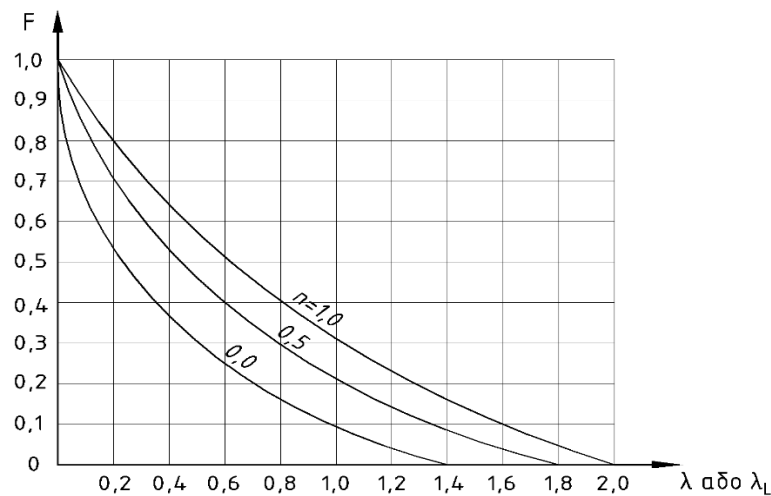


Рисунок 2 – Монограми для визначення функцій $F(\lambda, n); F(\lambda_L, n)$

Figure 2 – Monograms for identifying functions $F(\lambda, n); F(\lambda_L, n)$

Автором [6] отримано залежність для встановлення депресійної поверхні на будь-який момент часу спорожнення водоймища для однорідних укосів або схилів фільтраційний потік у яких відбувається із нескінченності зі сторони ґрунтового масиву (рис. 3).

З метою спрощення задачі пониження рівня води у водоймищі буде відбуватися за лінійним законом

$$h = V \cdot t, \quad (4)$$

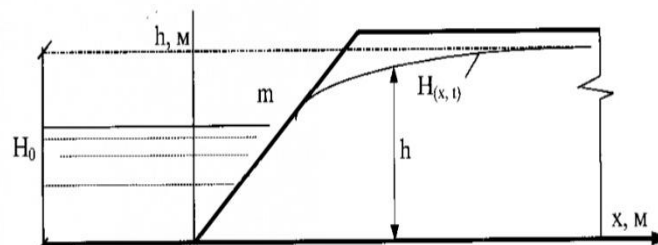


Рисунок 3 – Розрахункова схема з визначення депресійної поверхні в ґрунтовому масиві при пониженні рівня води у водоймищі

Figure 3 – Schematic diagram illustrating the determination of the depression surface in the soil mass when the water level in the reservoir is lowered

Під час зниження рівня води у водоймищі в ґрунтовому масиві виникає неусталений фільтраційний потік, який для випадку одновимірного потоку з достатньою точністю можна описати рівнянням

$$\frac{k \cdot h}{\mu} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{\partial H(x, t)}{\partial t}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт фільтрації;
 h – потужність фільтраційного потоку;
 μ – коефіцієнт водовіддачі.

Граничні умови для ґрунтового укосу, притік води у якому відбувається із нескінченності, запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} H(x, 0) &= H_0; \quad 0 < x < \infty; \quad \text{при } t = t_0 = 0; \\ H(x, 0) &= H_0 - V \cdot t = h_1; \quad 0 < t < \infty; \\ \frac{\partial H(+\infty, t)}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Розв'язок даної задачі є аналогічним рішенням з теорії теплопровідності. Це дозволило використати ряд формул з даної теорії. Тоді розв'язок рівняння (5) з урахуванням граничних умов (6) отримаємо у вигляді:

$$H_{(x,t)} = H_0 - V \cdot t + (V \cdot t) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{\frac{k \cdot h}{\mu} \cdot t}} \right), \quad (7)$$

де H_0 – глибина води у водоймищі до початку спорожнення;
 t – будь-який час спорожнення рівня води у водоймищі;
 x – горизонтальна координата деякої точки, що характеризує розміщення кривої депресії;
 V – швидкість пониження рівня води у водоймищі.

Метою роботи є встановлення закономірностей динаміки депресійної поверхні у водонасичених укосах ґрунтових спорудах під час зниження рівня води у водоймищі.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети були виконані теоретичні дослідження з використанням залежності (7). При цьому, дослідження виконувались для параметрів ґрунтових споруд і швидкості пониження рівня води у водоймищі в межах критерію $0,05 \leq \alpha \leq 5,0$, що визначає необхідність урахування неусталеного фільтраційного потоку в оцінці стійкості укосів. Крім того, в процесі досліджень розглянуто два види основ: 1 – з добре водопроникливими ґрунтами $k_f > 0,75$ м/добу; 2 – з мало водопроникливими ґрунтами $k_f < 0,05$ м/добу.

Звичайно, мало водопроникна основа з $k_f < 0,05$ м/добу прийнята з допущенням, так, як швидкість фільтрації в доному випадку незначна у порівнянні зі швидкістю зниження рівня води у водоймищі.

Розрахунки виконувались для наступних значень α : 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0, що дозволило урахувати практично основні випадки, які зустрічаються під час експлуатації ґрунтових споруд в умовах зниження рівня води у водоймищі.

За результатами проведених досліджень для однорідних ґрунтових споруд трапецеїдального перерізу розташованих на мало водопроникливих основах, побудовані графіки залежності (рис. 4):

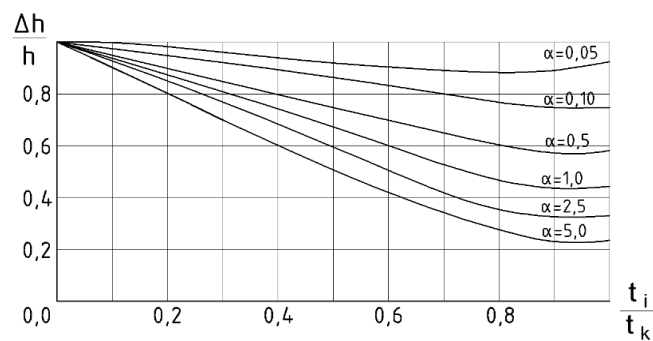


Рисунок 4 – Динаміка кривої депресії у тілі укосу дамби при пониженні рівня води у водоймищі, що розміщена на мало водопроникливих ґрунтах основи

$$\frac{\Delta h}{h} = f\left(\frac{t_i}{t_k}\right), \quad (8)$$

де $\Delta h = h_i$ – розміщення депресійної поверхні в масиві споруди на деякий час t_i ;
 h – початкове розміщення депресійної поверхні в тілі укосу;
 t_k — кінцевий момент часу який відповідає цілковитому зниженню рівня води.

На основі одержаних розрахункових даних підтверджено, що при даних умовах будівництва і експлуатації ґрунтових споруд депресійна поверхня має значне відставання від зниження рівня води у водоймищі. Наприклад, при $\alpha=5,0$ відставання депресійної поверхні на момент часу $\left(\frac{t_i}{t_k}\right)=1$, становить $0,25h$, а для $\alpha=0,05$ складає $0,92h$. Крім того, в процесі досліджень встановлено, що швидкість падіння депресійної поверхні по висоті укосу змінюється. Її значення в початковий момент часу зростає, потім зменшується, а при незначному співвідношенні $\left(\frac{t_i}{t_k}\right)$ падіння депресійної поверхні практично не відбувається.

Аналогічно були виконані дослідження для випадку, коли споруда розташовані на добре водопроникливих ґрунтах основи. Результати досліджень наведені на рис. 5.

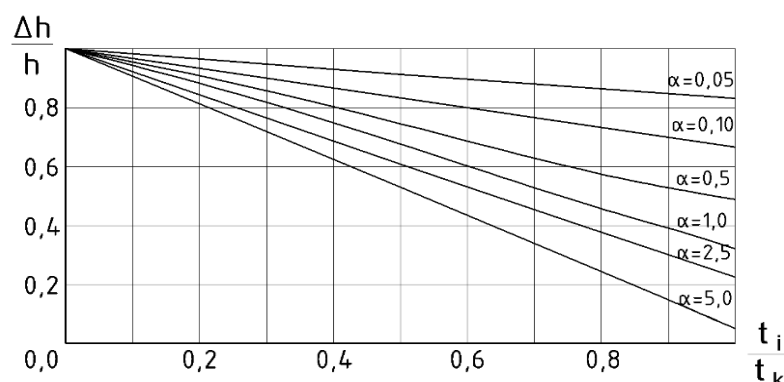


Рисунок 5 – Динаміка кривої депресії у тілі укосу дамби при пониженні рівня води у водоймищі, що розміщена на добре водопроникливих ґрунтах основи

Figure 5 – Variation in the depression curve within the dam slope body as the water level in the reservoir decreases, where the dam is situated on highly permeable foundation soils

Висновки

На основі проведених досліджень встановлено, що за прийнятих умов будівництва і експлуатації ґрунтових споруд відставання депресійної поверхні від рівня води при $\alpha=5,0$ складає всього $0,05h$, а при $\alpha=0,05$ воно рівне $0,88h$. Крім того, на відміну від розрахункової схеми з мало водопроникними ґрунтами основи, падіння депресійної поверхні в тілі укосу змінюється незначно. Для даного випадку на динаміку депресійної поверхні в тілі укосу значно впливає дренуюча здатність ґрунту основи, що забезпечує рух фільтраційного потоку у вертикальному напрямку. При цьому градієнт напору дорівнює одиниці, а падіння депресійної поверхні в тілі укосу відбувається практично з однаковою швидкістю.

Перелік посилань

1. Демчишин М. Г. Техногенні впливи на геологічне середовище території України. Київ : Наукова думка, 2004. 205 с.
2. David G. Engineering Geology: Principles and Practice. Berlin : Springer, 2008. 429 p.
3. Кузло М. Т. Вплив зниження рівня води на міцність ґрунтового укосу. *Підвищення ефективності осушувально-зволожувальних систем* : зб. наук. праць. Київ : УкрНДІГІМ, 1985. С. 134–137.
4. Кузло М. Т. Встановлення режиму фільтрації у ґрунтових укосах при пониженні рівня води. *Меліорація і водне господарство* : міжвідомчий темат. наук. збірник. Київ : Аграрна наука, 2004. Вип. 91. С. 64–274.
5. Мельничук В. Г., Новосад Я. О., Міхницька Т. П. Інженерна геологія : навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2013. 351 с.
6. Кузло М. Т. Дослідження фільтраційних сил у ґрунтовому укосі при зниженні рівня води у б'єфі. *Гідротехнічні споруди на меліоративних системах* : зб. наук. праць. Київ : УкрНДІГІМ, 1986. С. 84–90.

DYNAMICS OF THE PHREATIC SURFACE IN THE BODY OF EARTH STRUCTURES DURING DRAWDOWN OF WATER LEVEL IN A RESERVOIR

Kuzlo Mykola Trokhimovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine), Head of the Department of Automobile Roads, Bases and Foundations, e-mail: kuzlo-@ukr.net, +380966890792, <https://orcid.org/0000-0001-9242-2478>

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

Summary. The article analyzes the condition of water-saturated earth slopes of structures under conditions of fluctuating water levels in reservoirs. A criterion has been substantiated for the necessity of considering hydrodynamic forces arising from unsteady seepage flow in water-saturated earth slopes during water level drawdown in reservoirs with different intensities. The relationship has been obtained for determining the phreatic surface within homogeneous water-saturated slopes at any moment during reservoir emptying, where groundwater flow occurs from infinity on the side of the soil mass.

Regularities in the dynamics of the phreatic surface in water-saturated earth slopes during water level drawdown in reservoirs have been established for two types of foundations differing in permeability.

Based on the research results, graphical relationships describing the dynamics of the phreatic surface in water-saturated slopes during water level drawdown in reservoirs have been constructed for homogeneous earth structures with a trapezoidal cross-section located on low-permeability and permeable foundations. It has been established that under certain construction and operation conditions of earth structures, the phreatic surface significantly lags behind the decrease in the reservoir water level. In addition, the study shows that the rate of decline of the phreatic surface along the slope height varies, which may significantly affect the intensity of reservoir drawdown.

Keywords: water-saturated earth slopes, reservoirs, phreatic surface, hydrodynamic forces, seepage flow.

References

1. Demchyshyn, M. H. (2004) *Technogenic impacts on the geological environment of the territory of Ukraine*. Kyiv: Naukova Dumka. 205 p. [In Ukrainian].
2. David, G. (2008) *Engineering Geology: Principles and Practice*. Berlin: Springer. 429 p.
3. Kuzlo, M. T. (1985) Impact of water level lowering on the stability of a soil slope, *Pidvyshchennia efektyvnosti osushuvalno-zvolozhuvalnykh system: zb. nauk. prats*, pp. 134–137. [In Ukrainian].
4. Kuzlo, M. T. (2004) Determination of the filtration regime in soil slopes during water level lowering, *Melioratsiia i vodne hospodarstvo: mizhvidomchyi temat. nauk. zbirnyk*, (91), pp. 64–274. [In Ukrainian].
5. Melnychuk, V. H., Novosad, Ya. O. and Mikhnytska, T. P. (2013) *Engineering geology: study guide*. Rivne: NUVHP. 351 p. [In Ukrainian].
6. Kuzlo, M. T. (1986) Study of filtration forces in a soil slope during water level lowering in the reach, *Hidrotekhnichni sporudy na melioratyvnykh systemakh: zb. nauk. prats*, pp. 84–90. [In Ukrainian].

Дата надходження до редакції 18.01.2026.

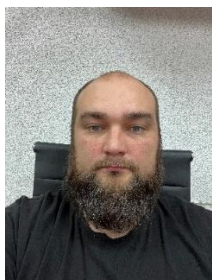
Дата прийняття статті після рецензування 05.02.2026.

УДК 721
UDC 721

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-230-237

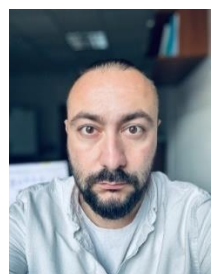
**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ПІДЛОГОВИХ
КОНСТРУКЦІЙ ПО ҐРУНТУ БУДІВЕЛЬ ЛОГІСТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

**COMPUTER MODELING OF HEAT FLOW IN FLOOR STRUCTURES ON THE
GROUND OF LOGISTICS INFRASTRUCTURE BUILDINGS**



Кулінко Євген Олександрович, асистент кафедри теплотехніки, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна,
e-mail: kulinko.ieo@knuba.edu.ua, тел. +380993254951.

<https://orcid.org/0000-0002-8834-3600>



Погосов Олександр Григорович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплотехніки, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна,
e-mail: pohosov.oh@knuba.edu.ua, тел. +380977883483.

<https://orcid.org/0000-0003-2158-8897>



Пасічник Павло Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплотехніки, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна,
e-mail: pasichnyk.po@knuba.edu.ua, тел. +380953328242.

<https://orcid.org/0000-0001-8499-6949>



Габа Крістіна Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплотехніки, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна,
e-mail: tsykal.ko@knuba.edu.ua, тел. +380973344028.

<https://orcid.org/0000-0003-2201-1408>



Пашкова Лариса Володимирівна, старший викладач кафедри теплотехніки, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна,
e-mail: pashkova.lv@knuba.edu.ua, тел. +380500212320.

<https://orcid.org/0009-0001-2056-6090>

Анотація: Метою роботи є розробка комп'ютерної моделі теплового потоку підлоги по ґрунту з урахуванням радіогенного потоку землі для оцінки енергоефективності будівельних конструкцій. Як об'єкт моделювання розглядається прямокутна бетонна плита підлоги, розміщена на ґрунті, з можливим периметральним утепленням смугою утеплювача, де враховуються теплопровідність матеріалів, температура внутрішнього повітря та ґрунту, а також стаціонарний двовимірний процес теплопередачі. Було проаналізовано існуючі підходи до утеплення підлог на ґрунті згідно з українськими та європейськими нормативами, а також запропоновано принципи чисельного моделювання з використанням методу скінченних різниць та ітераційного розв'язання для рівняння теплопровідності з змінними коефіцієнтами. Поставлена мета досягається шляхом розв'язання задач моделювання поля температур у плиті, утеплювачі та ґрунті з урахуванням граничних умов, геометрії будівлі та теплотехнічних характеристик матеріалів, що дозволяє оцінювати трансмісійні тепловтрати для різних ширини утеплення. Для зручного застосування запропонованої моделі на практиці слід вводити додаткові параметри, які уможливають облік різних типів ґрунтів, товщини утеплювача та економічної доцільності заходів, з обов'язковим врахуванням нормативних вимог до енергоефективності будівель логістичної інфраструктури. Найважливішими результатами є розроблена 2D-модель теплопередачі, яка підтверджує концентрацію тепловтрат у крайових зонах підлоги та демонструє зниження втрат на 20-25% при периметральному утепленні шириною 2-3 м, а також співвідносність з інженерними методиками за ДСТУ EN ISO 13370:2022 та ДСТУ 9190:2022. Значимість отриманих результатів полягає в тому, що застосування запропонованої методики дозволяє не лише оптимізувати утеплення для будівель з великими площами підлог на ґрунті, підвищити енергоефективність та зменшити енергоспоживання, але й слугувати основою для оновлення нормативних стандартів, особливо при реконструкції існуючих об'єктів.

Ключові слова: теплопровідність, підлога на ґрунті, теплоізоляція; крайова зона, периметральне утеплення, чисельне моделювання, метод скінченних різниць, енергоефективність, будівлі логістичної інфраструктури.

Вступ. При розробці теплової оболонки будівлі всі зовнішні огорожувальні конструкції мають бути утеплені з метою досягнення як енергетичних показників споживання енергії внутрішніми інженерними системами будівлі для досягнення бажаного класу енергоефективності будівлі [1] так і забезпечення комфортних умов для перебування людини біля внутрішніх поверхонь зовнішніх огорожувальних конструкцій [2]. Згідно українських нормативів [2, 3] проектування огорожувальних конструкцій направлення на досягнення мінімально допустимого опору теплопередачі [2] та мінімізації впливу містків холоду. Існують різні підходи для досягнення енергоефективності будівлі [4] це і мінімізація обсягу трансмісійних втрат теплоти, тобто збільшення товщини теплової ізоляції та автоматизація інженерних систем будівлі із повним чи частковим застосуванням альтернативних та відновлювальних джерел енергії, наприклад теплопостачання від теплових насосів [5]. Дуже часто із врахуванням попереднього досвіду проектування відбувається нехтування утепленням конструкцій, що контактують із ґрунтом. Наприклад, європейський підхід пропонує користуватися правилом «маркера», що вимагає нерозривності контуру утеплення на всіх поверхнях будівлі, що контактують із навколишнім середовищем, в тому числі із ґрунтом, а не лише із зовнішнім повітрям. Якщо для житлових будівель із підлогою на ґрунті не виникає питань в необхідності утеплення, то для громадських такі процеси супроводжуються дискусіями стосовно доцільності таких заходів. Для великих торговельних центрів де досить великі площі підлог на ґрунті виникає питання економічної доцільності утеплення всієї площини підлоги, що вимагається [3] як обов'язкова умова і обсязі не менше 50 мм утеплювача. Про те при достатньо великих площах та геометричних параметрах ширини та довжини підлогових покриттів, що характерним елементом логістичних будівель транспортної інфраструктури (як-то складів матеріалів, центрів логістики, перевалочних пунктів) необхідно проаналізувати утеплення лише периметральних зон підлог, як зображено на рисунку 1, через які відбуваються найбільші обсяги трансмісійних тепловтрат.

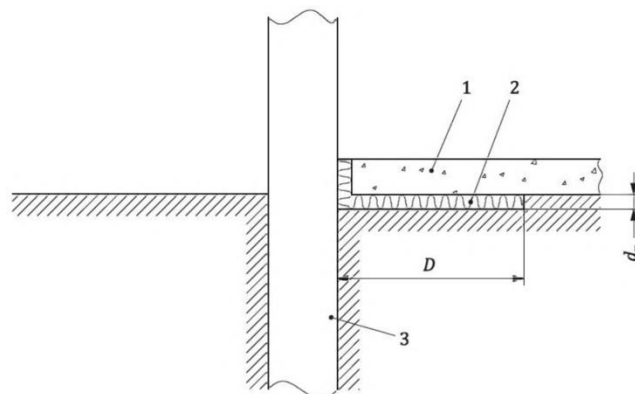


Рисунок 1 – Схема утеплення крайової зони підлоги на ґрунті [6, 7]

1- шар підлоги; 2 – горизонтальне теплоізолювання; 3 – стіна фундаменту; d_n – товщина утеплювача; D – ширина утеплення

Figure 1 – Scheme of edge-zone insulation of a floor on the ground [6, 7]

1 – floor layer; 2 – horizontal thermal insulation; 3 – foundation wall; d_n – thickness of insulation; D – width of insulation.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом моделі є підлога по ґрунту будівлі у вигляді прямокутної бетонної плити розмірами X_1 та X_2 у плані та товщиною D_{bet} мм. Плита розміщена безпосередньо на ґрунті, рівень підлоги співпадає з рівнем ґрунту. По периметру плити на ширину L_{ins} утеплено смугою із пінополіуретану товщиною D_{ins} , яка власне розміщена під бетонною плитою (між бетоном та ґрунтом). Таким чином, центральна неутеплена частина плити має розміри $(X_1 - 2 \cdot L_{ins}) \times (X_2 - 2 \cdot L_{ins})$, де тепло передається безпосередньо через бетон до ґрунту, а в периметральних зонах – через бетон та утеплювач відповідно.

Температура повітря всередині будівлі (верхньої поверхні плити) приймається постійною $T_{in} = 20$ °С. Температура ґрунту на глибині 10 м приймається для спрощення рівною 10 °С [8, 9]. Теплопровідність ґрунту очевидно (λ , Вт/м·К) значно залежить від типу ґрунту, вологості, щільності та інших факторів, таких як температура та стан. Нижче наведено таблицю 1 з типовими числовими значеннями.

Таблиця 1 – Показники теплопровідності для деяких типів ґрунтів

Table 1 – Thermal Conductivity Indicators for Some Types of Soils

Тип ґрунту	Сухий стан (Вт/м·К)	Насичений/вологий стан (Вт/м·К)	Джерело даних
Пісок (sand)	0.3–0.4 (мін. 0.3, макс. 0.9)	1.4–2.4 (насичений: 2.0–3.0)	[10]
Гравій (gravel)	0.4 (мін. 0.4, макс. 0.9)	1.6–2.5 (насичений: 1.8)	[10]
Глина/мул (clay/silt)	0.4–0.5 (мін. 0.4, макс. 1.0)	1.1–3.1 (насичений: 1.8)	[10, 11]
Суглинок/дерновий (till/loam)	немає даних	1.1–2.9 (типове: 2.4)	[10]
Торф (peat)	0.05–0.2	0.4–0.7 (насичений: 0.55; незмерзлий: 0.25–0.6)	[10, 12]
Піщані ґрунти (sandy soils)	0.25–0.6	0.7–2.0	[11]
Глинисті ґрунти (clayey soils)	0.25–0.6	0.55–1.15	[12]

Таким чином загальний діапазон для більшості ґрунтів становить $0,15 \div 2,5$ Вт/м·К у природному стані. В моделі прийнято значення 1 Вт/м·К.

Процес теплопередачі представимо як стаціонарний та двовимірний (враховуємо бічний потік тепла в плиті через різницю в термічному опорі в центрі та по периметру). Спрощуємо модель, виключаючи з моделі конвекцію повітря та вважаючи плиту тонкою порівняно з горизонтальними розмірами, але враховуючи 2D-ефект в перерізі (наприклад, по осі x-z, де x - горизонтальний напрямок, z - вертикальний через товщину плити). Припускаємо, що в напрямку X_2 модель безкінечна, тому розглядаємо двовимірну задачу.

При комп'ютерному моделюванні теплопровідність бетону λ_{bet} приймається відповідною типовій (2,04 Вт/(м·К)). Теплопровідність утеплювача λ_{ins} - як для пінополіуретану (0,025 Вт/(м·К)).

Модель повинна враховувати вплив ґрунту, представляючи його як напівпростір з теплопровідністю λ_{soil} (типове значення для ґрунту як описано вище – 1 Вт/(м·К)). Ґрунт оточує плиту знизу та з боків. Рівень поверхні ґрунту співпадає з рівнем верхньої відмітки плити. Поверхня ґрунту поза будівлею приймається рівною T_{out} .

Координатна система: $z = 0$ — верхня поверхня плити та поверхня ґрунту поза будівлею, z — інвертована та збільшується вниз; $x = 0$ — центр плити (симетрія), $x = X_1/2$ — край плити. Модель — дзеркальна.

Модель визначена на проміжках:

- Бетонна плита: $0 \leq x \leq X_1/2$, $0 \leq z \leq D_{bet}$, $\lambda = \lambda_{bet}$.
- Утеплювач: $(X_1/2 - L_{ins}) \leq x \leq X_1/2$, $D_{bet} \leq z \leq D_{bet} + D_{ins}$, $\lambda = \lambda_{ins}$.
- Ґрунт: $0 \leq x \leq X_{max}$ ($X_{max} \gg X_1/2$), $z \geq 0$ (з виключенням областей плити та утеплювача), $\lambda = \lambda_{soil}$. В комп'ютерній моделі приймається $X_{max} = 10\text{--}20$ м, $Z_{max} = 10\text{--}20$ м.

Рівняння для стаціонарної теплопровідності з змінною теплопровідністю в усіх областях описується наступним чином [13]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

де $\lambda(x, z)$ - теплопровідність матеріалу залежно від області (λ_{bet} , λ_{ins} або λ_{soil}).

Граничні умови представимо наступним чином:

- На верхній поверхні ($z = 0$): $0 \leq x \leq X_1/2$: $T = T_{in} = 20$ °C (температура в приміщенні); $x > X_1/2$: $T = T_{out} = -22$ °C (поверхня ґрунту поза будівлею).
- На великій глибині ($z = Z_{max}$): $T = T_{out}$ (стабільна температура ґрунту, приймаємо для моделі 10 °C).
- На великій горизонтальній відстані ($x = X_{max}$): $T = T_{out}$.
- Симетрія при $x = 0$: $\partial T / \partial x = 0$ (адіабатний процес для зменшення геометричних розмірів моделі).

Застосовуємо метод скінченних різниць (finite difference method), а саме його різновид – метод скінченних різниць з ітераційним розв'язком (Successive Over-Relaxation) [14] для рівняння $\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0$. Дискретизуємо рівняння на сітці (наприклад, $n_x \times n_z = 100 \times 200$ точок), отримавши при цьому систему лінійних рівнянь $AT = b$, де T — вектор температур у вузлах сітки. Розв'язок $T = A^{-1} b$ отримуємо чисельно (код для середовища SciLAB 2025.1.0 наведено в додатку до статті).

Для прикладу приймаємо числові значення: $X_1 = X_2 = 10$ м (площа 100 м²), $D_{bet} = D_{ins} = 0,1$ м, $L_{ins} = 1$ м, $\lambda_{bet} = 1,4$ Вт/(м·К), $\lambda_{ins} = 0,025$ Вт/(м·К), $\lambda_{soil} = 1,0$ Вт/(м·К).

Чисельний розв'язок дає поле температур $T(x, z)$. А загальна тепловтрата Q обчислюється очевидно як інтеграл потоку тепла на верхній поверхні плити:

$$Q = \int_0^{0.5X} \left(-\lambda_{bet} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \right) dx \cdot 2 \cdot X_2 \quad (2)$$

де множник 2 враховує повну ширину, множник

X_2 – довжину плити в перпендикулярному напрямку моделі.

Для довільних значень параметрів модель можна перерахувати чисельно. Для перевірки роботи комп'ютерної моделі можна провести інженерний розрахунок, використовуючи апробовані емпіричні формули [6, 7]. Розрахунки по наведеній інженерній методиці дають схожі результати до комп'ютерної моделі (Таблиця 2).

Візуалізація полів температур (рисунки 2, 3) вказують на фізичну застосовність запропонованої комп'ютерної моделі.

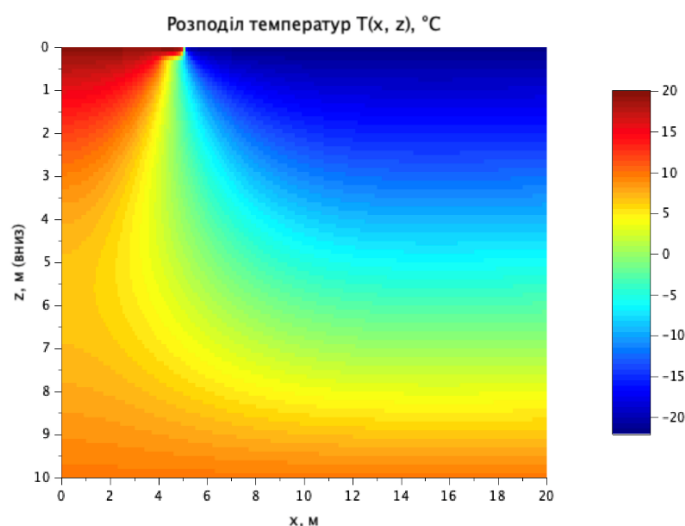


Рисунок 2 – Розподіл температурних полів при утепленні смуги плити шириною 1 м
Figure 2 – Temperature field distribution in the edge zone of a 1-m-wide floor slab with insulation

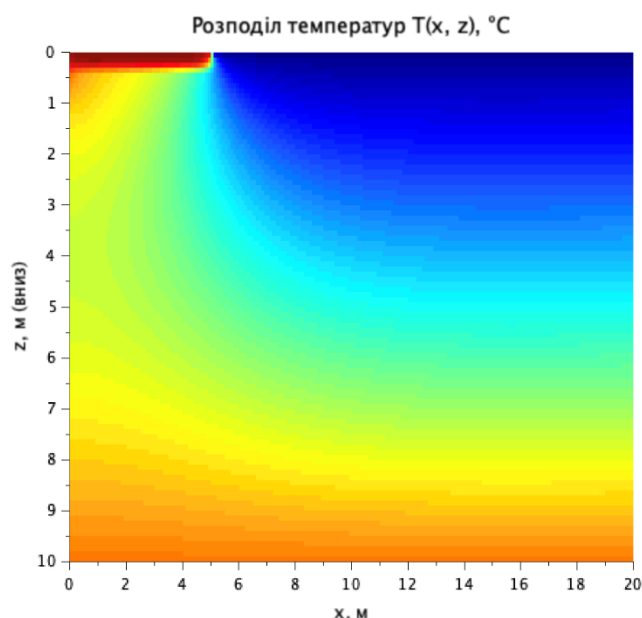


Рисунок 3 – Розподіл температурних полів при утепленні всієї площини плити підлоги
Figure 3 – Temperature field distribution with full-area floor slab insulation

Таблиця 1 – Результати розрахунку моделі і розрахунків згідно ДСТУ EN ISO 13370 та ДСТУ 9190

Table 1 – Results of model calculation and calculations according to DSTU EN ISO 13370 and DSTU 9190

Тип ґрунту	Сухий стан (Вт/м·К)	Насичений/вологий стан (Вт/м·К)	Джерело даних
Пісок (sand)	0.3–0.4 (мін. 0.3, макс. 0.9)	1.4–2.4 (насичений: 2.0–3.0)	[3]
Гравій (gravel)	0.4 (мін. 0.4, макс. 0.9)	1.6–2.5 (насичений: 1.8)	[3]
Глина/мул (clay/silt)	0.4–0.5 (мін. 0.4, макс. 1.0)	1.1–3.1 (насичений: 1.8)	[3, 4]
Суглинок/дерновий (till/loam)	немає даних	1.1–2.9 (типове: 2.4)	[3]
Торф (peat)	0.05–0.2	0.4–0.7 (насичений: 0.55; незмерзлий: 0.25–0.6)	[3, 5]
Піщані ґрунти (sandy soils)	0.25–0.6	0.7–2.0	[4]
Глинисті ґрунти (clayey soils)	0.25–0.6	0.55–1.15	[5]

Висновки. Проведене чисельне моделювання теплопровідності підлоги по ґрунту підтвердило, що найбільші тепловтрати зосереджуються саме у крайових ділянках (рисунки 2, 3). Застосування утеплення смугами шириною 2-3 м під плитою в ділянках під зовнішніми стінами дозволяє знизити теплові втрати крізь конструкцію на рівні 20-25 % без необхідності суцільного утеплення всієї площини підлоги.

Розроблена 2D модель теплопередачі з урахуванням неоднорідної теплопровідності дозволяє оцінювати теплові потоки з урахуванням різних типів ґрунтів, товщини утеплювача та геометрії будівлі. Отримані результати є співвідносними із результатами отриманими за інженерними методиками [6, 7], що підтверджує коректність чисельної моделі.

Для будівель з великими та особливо великими площами підлоги на ґрунті, якими є як правило будівлі логістичної інфраструктури, має бути синтезований комбінований підхід із вибором товщини та ширини периметрального утеплення підлоги із врахуванням теплотехнічних характеристик [2, 3] та економічних показників.

Запропонована методика, очевидно, має вищу точність результатів розрахунків, оскільки враховує теплопровідність масиву ґрунту під конструкцією підлоги на відміну від методики [6, 7] та має бути взята за основу для оновлення чинних стандартів для розробки проектної документації. Такий підхід буде дуже актуальним для існуючих будівель при капітальному ремонті чи реконструкції, де немає можливості утеплювати всю площу підлоги.

Перелік посилань

1. Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27 жовтня 2020 року № 260 «Про затвердження мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель», зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 18 грудня 2020 р. за № 1257/35540.
2. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель.
3. ДСТУ 9191:2022 Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель.
4. Погосов, О., Пасічник, П., & Кулінко, Є. (2023). Вплив деяких проектних рішень на клас енергетичної ефективності будівлі. *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA»*, (December 22, 2023; Coventry, UK), 214–217. Retrieved from <https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/1526>.
5. Кулінко, Є. О., Кузицький, І. Т., & Погосов, О. Г. (2017). Теплові насоси як джерела низькотемпературного теплопостачання. *Energy-efficiency in civil engineering and architecture*, (9), 132-136.

6. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.
7. ДСТУ EN ISO 13370:2022 Теплові характеристики будівель. Теплопровідність через землю. Методи розрахунку (EN ISO 13370:2017, IDT; ISO 13370:2017, IDT).
8. Givoni, B., & Katz, L. (1985). Earth temperatures and underground buildings. *Energy and Buildings*, 8(1), 15-25. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(85\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0378-7788(85)90011-8).
9. Christoph Clauser, Jean-Claude Mareschal, Ground temperature history in central Europe from borehole temperature data, *Geophysical Journal International*, Volume 121, Issue 3, June 1995, Pages 805–817, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06440.x>.
10. Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., ... & Bernardi, A. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85, 101758. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101758>.
11. Farouki, O. T. (1981). The thermal properties of soils in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 5(1), 67-75. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(81\)90041-0](https://doi.org/10.1016/0165-232X(81)90041-0).
12. O. T. Farouki, Thermal properties of soils, No. CRREL-MONO-81-1 (1981), Cold Regions Research and Engineering Lab, Hanover. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA111734.pdf>.
13. Гільчук, А., Халатов, А., & Доник, Т. (2022). Теорія теплопровідності. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/83acae59-9dcd-4ad7-af4c-83aa3671a374/content>.
14. Youssef, I. K., Ali, S. M., & Hamada, M. Y. (2016). On the line successive overrelaxation method. *Applied and Computational Mathematics*, 5(3), 103-106. <https://doi.org/10.11648/j.acm.20160503.12>.

COMPUTER MODELING OF HEAT FLOW IN FLOOR STRUCTURES ON THE GROUND OF LOGISTICS INFRASTRUCTURE BUILDINGS

Yevhen Kulinko, Assistant of Department of Heat Engineering, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: kulinko.ieo@knuba.edu.ua, tel.+380993254951, <https://orcid.org/0000-0002-8834-3600>.

Oleksandr Pohosov, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor of Department of Heat Engineering, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: pohosov.oh@knuba.edu.ua, tel.+380977883483, <https://orcid.org/0000-0003-2158-8897>.

Pavlo Pasichnyk, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor of Department of Heat Engineering, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: pasichnyk.po@knuba.edu.ua, tel.+380953328242, <https://orcid.org/0000-0001-8499-6949>.

Kristina Gaba, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor of Department of Heat Engineering, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: tsykal.ko@knuba.edu.ua, tel.+380973344028, <https://orcid.org/0000-0003-2201-1408>.

Pashkova Larysa, Senior Lecturer of Department of Heat Engineering, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: pashkova.lv@knuba.edu.ua, tel.+380500212320, <https://orcid.org/0009-0001-2056-6090>.

Summary. The purpose of this work is to develop a computer model of heat flow in a floor on the ground, taking into account the radiogenic heat flux of the Earth, in order to assess the energy efficiency of building structures. The object of modeling is a rectangular concrete floor slab placed on the ground, with possible perimeter insulation by a strip of thermal insulation. The model considers the thermal conductivity of materials, the temperature of indoor air and soil, as well as a steady-state two-dimensional heat transfer process. Existing approaches to floor-on-ground insulation were analyzed in accordance with Ukrainian and European standards, and principles of numerical modeling using the finite difference method and iterative solution for the heat conduction equation with variable coefficients were proposed. The stated goal is achieved by solving the problem of temperature field simulation in the slab, insulation, and soil, taking into account boundary conditions, building geometry, and the thermal characteristics of materials, which makes it possible to evaluate transmission heat losses for different insulation widths. For convenient practical application, additional parameters should be introduced to account for different soil types, insulation thicknesses, and economic feasibility, while ensuring compliance with energy efficiency requirements for logistics infrastructure buildings. The most important results include the development of a 2D heat transfer model that confirms the

concentration of heat losses in the edge zones of the floor and demonstrates a reduction of 20–25% in losses with 2–3 m wide perimeter insulation. The model also shows consistency with engineering methods according to DSTU EN ISO 13370:2022 and DSTU 9190:2022.

The significance of the obtained results lies in the fact that the proposed methodology allows not only to optimize insulation for buildings with large ground-floor areas, improving energy efficiency and reducing energy consumption, but also to serve as a basis for updating regulatory standards, particularly during the renovation of existing facilities..

Keywords: thermal conductivity, floor on the ground, thermal insulation, edge zone, perimeter insulation, numerical modeling, finite difference method, energy efficiency, logistics infrastructure buildings.

References

1. Order of the Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine No. 260 of October 27, 2020 “On approval of the minimum requirements for the energy efficiency of buildings,” registered with the Ministry of Justice of Ukraine on December 18, 2020, under No. 1257/35540. [in Ukrainian].
2. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings. [in Ukrainian].
3. DSTU 9191:2022 Thermal insulation of buildings. Method for selecting thermal insulation materials for building insulation. [in Ukrainian].
4. Pohosov, O., Pasichnyk, P., & Kulinko, Ye. (2023). Influence of some design solutions on the energy efficiency class of a building. *Collection of scientific papers “SCIENTIA”*, 2023. URL: <https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/1526> [in Ukrainian].
5. Kulinko, Ye. O., Kuzytskyi, I. T., & Pohosov, O. H. (2017). Heat pumps as sources of low-temperature heat supply. *Energy-Efficiency in Civil Engineering and Architecture*. [in Ukrainian].
6. DSTU 9190:2022 Energy performance of buildings. Method for calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting, and domestic hot water supply. [in Ukrainian].
7. DSTU EN ISO 13370:2022 Thermal performance of buildings — Heat transfer via the ground — Calculation methods (EN ISO 13370:2017, IDT; ISO 13370:2017, IDT). [in Ukrainian].
8. Givoni, B., & Katz, L. (1985). Earth temperatures and underground buildings. *Energy and Buildings*, 8(1), 15-25. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(85\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0378-7788(85)90011-8).
9. Christoph Clauser, Jean-Claude Mareschal, Ground temperature history in central Europe from borehole temperature data, *Geophysical Journal International*, Volume 121, Issue 3, June 1995, Pages 805–817, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06440.x>.
10. Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., ... & Bernardi, A. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85, 101758. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101758>.
11. Farouki, O. T. (1981). The thermal properties of soils in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 5(1), 67-75. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(81\)90041-0](https://doi.org/10.1016/0165-232X(81)90041-0).
12. O. T. Farouki, Thermal properties of soils, No. CRREL-MONO-81-1 (1981), Cold Regions Research and Engineering Lab, Hanover. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA111734.pdf>.
13. Гільчук, А., Халатов, А., & Доник, Т. (2022). Теорія теплопровідності. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/83acae59-9dcd-4ad7-af4c-83aa3671a374/content>.
14. Youssef, I. K., Ali, S. M., & Hamada, M. Y. (2016). On the line successive overrelaxation method. *Applied and Computational Mathematics*, 5(3), 103-106. <https://doi.org/10.11648/j.acm.20160503.12>.

Дата надходження до редакції 15.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 09.02.2026.

УДК 69.003.13:005.8:502.131.1
UDC 69.003.1:005.8:502.131.1

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-238-248

АНАЛІЗ ДІЯЛЬНОСТІ ІНЖЕНЕРА-КОНСУЛЬТАНТА В КОНТРАКТНІЙ МОДЕЛІ FIDIC У ПАРАДИГМІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

ANALYSIS OF THE CONSULTANT ENGINEER'S ROLE IN THE FIDIC CONTRACTUAL FRAMEWORK WITHIN THE PARADIGM OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT



Левіщенко Олена Степанівна, кандидат економічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: osl-economica@ukr.net, тел. +380672536818

<https://orcid.org/0000-0003-3704-5352>



Дзюба Оксана Миколаївна, кандидат економічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: dzyuba2006@gmail.com, тел. +380679644273

<https://orcid.org/0000-0002-2411-5844>



Нищенко Владислав Віталійович, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: vladonnishenko@gmail.com, тел. +380631218787

<https://orcid.org/0009-0003-6220-640X>

Анотація. У статті досліджено професію інженера-консультанта в межах контрактної моделі FIDIC через призму концепції сталого розвитку. Підкреслено, що в умовах післявоєнної відбудови України роль інженера-консультанта значно зростає, оскільки він виступає незалежною професійною інституцією, відповідальною за координацію учасників проєкту, управління ризиками, контроль якості та забезпечення прозорості процесів. На основі аналізу нормативних документів, міжнародних звітів та наукових джерел визначено зміст інжинірингового консалтингу та функціональні обов'язки інженера-консультанта у контрактах FIDIC.

Розкрито сутність сталого розвитку в інфраструктурній сфері та встановлено його три ключові складові: економічну, екологічну та соціальну. Показано, що професійні функції інженера-консультанта органічно відповідають кожній із цих складових. Економічна сталість забезпечується через управління вартістю та ресурсами; екологічна - через впровадження кліматично стійких та природоорієнтованих рішень; соціальна - через взаємодію зі стейкхолдерами, дотримання вимог безпеки та підтримання інституційної доброчесності.

Установлено, що інженер-консультант може розглядатися як ключовий провідник та амбасадор принципів сталого розвитку в інфраструктурних проєктах, що дозволяє забезпечити довговічність, ефективність і безпечність інвестицій. Результати дослідження можуть бути використані для удосконалення системи управління інфраструктурними проєктами, гармонізації законодавства з міжнародними стандартами та розвитку професійних компетентностей інженерів-консультантів.

Ключові слова: інженер-консультант; інжиніринговий консалтинг; модель сталого розвитку; дорожні та мостові проєкти; контрактна модель FIDIC.

Постановка проблеми. Відновлення та модернізація інфраструктури України після масштабних руйнувань вимагають оновлення управлінських, технологічних і екологічних підходів до реалізації проєктів, зокрема у сфері автомобільних доріг і мостів. Традиційні моделі організації будівництва не забезпечують належного рівня прозорості, ефективності та довгострокової стійкості, що є критичним для транспортної інфраструктури, яка характеризується високою вартістю, складністю та значним суспільним впливом. У міжнародній практиці забезпечення цих вимог покладається на інженера-консультанта, який відповідно до стандартів FIDIC здійснює незалежний технічний, управлінський та контрольний супровід проєктів [1].

Глобальні виклики формують нові вимоги до життєвого циклу транспортних інфраструктурних об'єктів. Для дорожньої галузі особливо актуальними стають природоорієнтовані рішення, зменшення вуглецевого сліду при будівництві та експлуатації доріг і мостів, забезпечення безпеки руху, соціальна інклюзивність та впровадження антикорупційних механізмів у процесах управління та контролю [2, 3, 4]. Ці фактори визначають необхідність інтеграції принципів сталого розвитку в управління дорожніми та мостовими проєктами.

Наукова проблема полягає у недостатньому дослідженні ролі інженера-консультанта як інституційного елемента забезпечення сталості транспортних інфраструктурних проєктів. В українській практиці відсутній комплексний аналіз взаємозв'язку між професійними функціями інженера-консультанта в контрактах FIDIC та вимогами сталого розвитку. Це створює наукову прогалину, що зумовлює актуальність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання сталого розвитку в будівництві та інфраструктурі розглядається у низці сучасних робіт, де акцент зроблено на інтеграції екологічних, економічних і соціальних вимірів у моделі управління проєктами. У дослідженнях Пігуль О.В., Сьомушкіна В.О, Сердюк В.Р. , присвячених відновленню житлового фонду та інфраструктури України, підкреслюється необхідність переходу від традиційних підходів до комплексних моделей, що враховують життєвий цикл об'єктів, енергоефективність, зміни клімату та вимоги міжнародних донорів [5, 6].

Окремий напрям становлять дослідження інституційних механізмів впровадження відновлюваних джерел енергії та практик “зелених закупівель” із використанням умов контрактів FIDIC. У своїй роботі Цифра Т.Ю. аналізує потенціал застосування проформ FIDIC у проєктах реконструкції й розвитку енергетичної інфраструктури, включно з гірськими регіонами та локальними енергосистемами [7]. Незважаючи на тематичну орієнтацію на енергетику, принципи прозорості тендерних процедур, структурованості договірних відносин і підвищення довіри інвесторів наряду стосуються реалізації дорожніх і мостових проєктів, які також характеризуються високими інвестиційними ризиками.

У контексті управління інвестиційно-будівельними процесами науковці дедалі активніше акцентують увагу на значущості інжинірингу та проектного менеджменту. Дослідження, присвячені інноваціям у державному управлінні будівництвом, підкреслюють зростання значущості інженера-консультанта як багатоаспектного управлінського суб'єкта, що поєднує функції BIM-менеджера, комерційного фахівця та керівника будівельних проєктів [5]. У нормативних документах і професійних описах посадові обов'язки інженера-консультанта в будівництві деталізовані через контроль якості, управління вартістю, координацію учасників і аналіз ризиків [1, 8]. Ці функції інженера-консультанта

є фундаментальними у сфері автомобільних доріг і мостів, яка потребує високого рівня контролю та інженерної відповідальності.

Водночас міжнародні аналітичні звіти FIDIC і партнерських організацій акцентують, що сучасна інженерна практика повинна відповідати викликам зміни клімату, розвитку низьковуглецевої інфраструктури та впровадженню природоорієнтованих рішень. У документах щодо інфраструктури та клімату та у “Nature-Positive Infrastructure Playbook” окреслено очікування до інженерів як до ключових провідників кліматичної та екологічної політики в дорожніх та мостових проєктах [2, 9].

Разом з тим, попри значну кількість досліджень, присвячених окремим аспектам — сталому розвитку в будівництві, інституційній ролі контрактів FIDIC та змісту діяльності інженера-консультанта — комплексні праці, що безпосередньо розглядають діяльність інженера-консультанта в межах контрактної моделі FIDIC саме крізь призму концепції сталого розвитку, практично відсутні. Це дозволяє визначити дану статтю як таку, що спрямована на заповнення виявленої наукової прогалини.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження ролі інженера-консультанта в контексті реалізації проєктів транспортної інфраструктури відповідно до умов контрактної моделі FIDIC, визначення сутності сталого розвитку для дорожньо-мостової галузі та обґрунтування взаємозв'язку між функціональною роллю інженера-консультанта і вимогами сталості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Повномасштабна військова агресія Росії проти України призвела до безпрецедентних втрат інфраструктури, що формують нові умови та виклики для її відновлення. За звітом Київської школи економіки, прямі збитки транспортної інфраструктури станом на листопад 2024 року становлять 38,5 млрд доларів США, з яких 30,9 млрд доларів США припадають на дороги та мости [10]. Масштаби руйнувань сформували потребу не лише у фізичній відбудові, але й у переосмисленні підходів до інфраструктурного розвитку на принципах довговічності, безпеки, енергоефективності та прозорого управління.

Паралельно з цим, міжнародні донори та фінансові організації дедалі активніше висувають вимоги відповідності проєктів стандартам ESG та міжнародним підходам до управління ризиками. Саме тому роль інженера-консультанта в Україні стрімко зростає: він стає не просто технічним супроводжувачем проєкту, а ключовою професійною інституцією, яка поєднує технічну експертизу, управлінські компетенції й відповідальність за впровадження сучасних екологічних та соціальних стандартів.

Це безпосередньо підводить до центральної тези цього дослідження: інженер-консультант може й повинен бути основним амбасадором принципів сталого розвитку під час реалізації інфраструктурних проєктів в Україні. Його функції, визначені законодавством [8,11,12] та міжнародною практикою, прямо співпадають із вимогами ефективності, прозорості та стійкості, що визначають сучасний підхід до відновлення інфраструктури. Відповідно до Закону України «Про архітектурну діяльність» [11], інжиніринг трактується як діяльність з надання послуг інженерного та технічного характеру, до яких належать проведення попередніх техніко-економічних обґрунтувань і досліджень, експертизи проєкту, розробка програм фінансування будівництва, організація виготовлення проєктної документації, проведення конкурсів і торгів, укладання договорів підяду, координація діяльності всіх учасників будівництва, а також здійснення технічного нагляду за будівництвом об'єкта архітектури та консультації економічного, фінансового або іншого характеру.

У наукових джерелах інжиніринг розглядається як інституційний механізм забезпечення технічної якості, надійності та відповідності будівельних рішень, що включає управління технічними ризиками та технологічними процесами [13].

Консалтинг в економічній та управлінській літературі має багатоваріантні трактування, та у даній статті розглядається як аналітична, управлінська та економіко-організаційна діяльність спрямована на аналітичне та економічне супроводження та інформування замовника щодо ключових аспектів реалізації проєкту.

Інженер-консультант поєднує дві площини діяльності - інжиніринг і консалтинг, що створюють єдину систему управління проєктом.

У професійних та нормативних документах інженер-консультант визначається як незалежний експерт, який забезпечує організаційний і консультаційний супровід, контроль якості виконаних робіт, координацію дій усіх учасників будівництва та захист інтересів замовника [1, 8, 1]. На нього покладається відповідальність за дотримання технічних регламентів, вимог безпеки, законодавства, а також за управління графіками, бюджетом та обсягами робіт.

У документі, присвяченому передумовам та перевагам залучення інженера-консультанта, підкреслюється, що ця діяльність є ключовою у реалізації проєктів, що фінансуються міжнародними фінансовими організаціями, включаючи Світовий банк і ЄБРР [15]. Запровадження посади інженера-консультанта в українську практику відповідає саме тим вимогам, які ці інституції висувають до системи контролю, управління ризиками та прозорості.

Стаття 1 Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» [12] визначає інженера-консультанта як фахівця із кваліфікаційним рівнем, підтвердженим органом із сертифікації персоналу, акредитованим у відповідній сфері згідно із законом, та/або суб'єкт господарювання, що має у своєму складі таких фахівців, який здійснює управління проєктом, забезпечує організаційне і консультаційне супроводження комплексу робіт, пов'язаних із створенням об'єкта архітектури, приймає від імені замовника відповідні рішення та виконує інші функції, визначені договором. Науково-правова експертиза Інституту держави і права НАН України засвідчує, що українське законодавство загалом відповідає міжнародній практиці, але потребує гармонізації у частині визначення повноважень, процедур та взаємодії учасників будівельного процесу [14]. Особливо наголошено на значенні інженера-консультанта у договорах типу «Проектуй-будуй», де саме він забезпечує контроль відповідності передпроектних рішень подальшим етапам реалізації.

У науковій літературі сталий розвиток у сфері будівництва визначається як застосування таких підходів до проєктування, реалізації та подальшої експлуатації об'єктів, що мінімізують негативний вплив на довкілля, підвищують енергоефективність та забезпечують довгострокову економічну стійкість [5]. У роботах, присвячених інтеграції принципів сталості в житлове та цивільне будівництво, показано, що сталий підхід ґрунтується на моделюванні ризиків, застосуванні інноваційних матеріалів, мінімізації ресурсних втрат та впровадженні сучасних організаційних моделей управління [6]. Ці положення є релевантними і для транспортної інфраструктури, оскільки дорожні та мостові проєкти характеризуються високою матеріалоємністю, чутливістю до кліматичних впливів та значним рівнем технічних і організаційних ризиків.

FIDIC у своїй Climate Change Charter наголошує, що інфраструктурні проєкти повинні плануватися із врахуванням майбутніх кліматичних сценаріїв, а інженери мають забезпечувати застосування рішень, що підвищують стійкість об'єктів, зменшують викиди парникових газів та сприяють переходу до низьковуглецевої економіки [3].

У документі WWF “Nature-Positive Infrastructure Playbook” акцентується, що сучасна інфраструктура повинна не лише мінімізувати шкоду довкіллю, а й сприяти збереженню екосистем і біорізноманіття, застосовуючи природоорієнтовані рішення, оптимізуючи землекористування та враховуючи вплив на локальні екологічні процеси [2].

Таким чином, сталий розвиток у будівництві - це не окремий напрям діяльності, а комплексна система вимог, що змінюють зміст управління проєктом і посилюють роль інженерно-консультаційної підтримки. На основі міжнародних документів FIDIC, WWF та SDGs, а також вітчизняних досліджень, можна виділити кілька ключових факторів, що визначають сталий інфраструктурний проєкт:

1. Кліматична стійкість і зменшення вуглецевого сліду. Необхідність врахування температурних змін, підвищення рівня опадів, ризиків паводків та екстремальних погодних явищ. Інженерні рішення повинні бути орієнтовані на адаптацію та довговічність [9].
2. Енергоефективність та використання відновлюваних джерел енергії. У дослідженнях щодо реконструкції житлового фонду підкреслюється критичне значення впровадження ВДЕ, зміни систем енергоменеджменту та застосування контрактів FIDIC у “зелених закупівлях” [7].
3. Прозорість, підзвітність і належне управління. Звіт State of the World's Governance & Corruption наголошує, що інфраструктурні проєкти мають високі ризики корупції, а тому сталий

розвиток неможливий без ефективних механізмів контролю, цифрового аудиту, антикорупційних інструментів та незалежного технічного нагляду [4, 17].

4. Соціальна безпека та орієнтація на громади. Сучасні дослідження підкреслюють, що інфраструктура повинна створювати соціальну цінність: забезпечувати доступність, безпеку, враховувати інтереси місцевих громад і запобігати соціальним конфліктам [16].

5. Приороорієнтовані рішення та захист біорізноманіття. WWF та FIDIC наголошують, що інфраструктурні проекти нового покоління мають мінімізувати вплив на екосистеми, використовувати природні механізми стабілізації середовища [2]. Міжнародні стандарти FIDIC визначають, що сучасний інженер повинен здійснювати управління життєвим циклом об'єкта, оцінку ризиків, управління змінами, аналіз ефективності та координацію стейкхолдерів [10].

З урахуванням вимог сталості це означає:

- інженер повинен враховувати кліматичні сценарії, оцінювати ризики і застосовувати адаптивні рішення;
- контролювати вибір матеріалів і технологій з позиції енергоефективності та екологічності;
- забезпечувати прозорість процесів та цифровий аудит незалежно від підрядника чи замовника;
- координувати взаємодію між громадами, владою, проєктантами, підрядниками і донорами;
- впроваджувати принципи “nature positive” у технічні рішення;
- підтримувати відповідність проєкту SDGs 9, 11, 13 та 15.

Наше дослідження дозволило визначити місце інженера-консультанта в інтеграції принципів сталого розвитку, що наведено на рис.1.



Рисунок 1 – Місце інженера-консультанта в інтеграції принципів сталого розвитку на етапах життєвого циклу інфраструктурного проєкту

Figure 1 – The position of the engineer-consultant in embedding sustainable development principles across the stages of an infrastructure project's life cycle

Джерело: складено авторами на основі даних дослідження

Таким чином, сталий розвиток суттєво розширює функціонал інженера-консультанта — від технічного контролю до інтегрованого управління стійкістю проєкту.

Післявоєнна відбудова України формує унікальний контекст, де сталий розвиток не є додатковим елементом, а об'єктивною необхідністю. Це потребує впровадження нових моделей управління, які поєднують контроль, проєктний менеджмент, інжиніринг та цифровий аудит.

Роль інженера-консультанта наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Роль інженера-консультанта як інтегратора економічної, екологічної та соціальної сталості в контрактах FIDIC

Figure 2 – The role of the consulting engineer as an integrator of economic, environmental, and social sustainability in FIDIC contracts

Джерело: складено авторами на основі даних дослідження

У таких умовах інженер-консультант стає ключовою інституцією, що здатна інтегрувати принципи сталості на всіх етапах реалізації проекту - від підготовки ТЕО до введення об'єкта в експлуатацію.

Інженер-консультант виконує комплекс технічних, управлінських та економічно-аналітичних функцій, які прямо відповідають вимогам сталого розвитку. По своїй сутності він є єдиною незалежною професійною ланкою, що забезпечує баланс між інтересами замовника, підрядника, громади та держави, а також відповідність проекту міжнародним стандартам. Саме тому в сучасних інфраструктурних моделях роль інженера-консультанта виходить за рамки технічного нагляду і перетворюється на роль інтегратора сталості.

Економічна сталість передбачає ефективне управління ресурсами, мінімізацію вартості життєвого циклу об'єкта та забезпечення прозорості фінансових процесів. Як показано у численних дослідженнях, відбудова інфраструктури потребує моделі, де порядок бюджетування, аудит і контроль виконання робіт є максимально прозорими і незалежними.

Інженер-консультант відповідає за:

- управління вартістю на всіх етапах проекту - від підготовки документації до контролю виконання робіт;
- аналіз обґрунтованості бюджетних рішень і перевірку фінансових ризиків;
- запобігання необґрунтованим витратам підрядника;
- оцінку вартості змін та оптимізацію проектних рішень;
- забезпечення прозорості закупівель;

Саме ці компетенції забезпечують економічну стійкість проекту, що є однією з ключових складових сталого розвитку.

Екологічна сталість інфраструктурних проектів визначається здатністю об'єкта адаптуватися до кліматичних змін, мінімізувати викиди та негативний вплив на довкілля. FIDIC та WWF у своїх документах формують чіткі вимоги до інженерних рішень нового покоління:

- інтеграція природоорієнтованих рішень,
- збереження екосистем,
- аналіз кліматичних сценаріїв,
- зменшення вуглецевого сліду проєкту [2, 3].

Інженер-консультант:

- контролює застосування матеріалів і технологій з низьким екологічним впливом;
- забезпечує відповідність проєкту екологічним стандартам, включно з вимогами SDG 13

“Climate Action”;

- оцінює ризики, пов’язані з екстремальними погодними умовами, паводками, зсувами та іншими кліматичними факторами [9];
- забезпечує реалізацію заходів, які посилюють тривалу інфраструктурну стійкість;
- організовує технічний контроль і моніторинг виконання робіт з урахуванням екологічних вимог.

Таким чином, інженер-консультант безпосередньо відповідає за екологічну сталість інфраструктури, поєднуючи технічні методи та екологічні стандарти.

Соціальна сталість включає безпечність, доступність і відповідність інфраструктури потребам людей. У сучасних дослідженнях підкреслюється важливість залучення громад, ефективної комунікації між учасниками проєкту та врахування інтересів місцевих спільнот [16].

Інженер-консультант:

- координує взаємодію між замовником, проєктантами, підрядниками, громадами та контролюючими органами;
- виступає нейтральною стороною у разі конфліктів;
- забезпечує прийняття рішень із врахуванням суспільного інтересу;
- перевіряє відповідність інфраструктурних рішень вимогам безпеки та доступності.

У договорах FIDIC ці функції закріплені формально - інженер виконує роль незалежного адміністратора контракту, який забезпечує баланс між усіма сторонами [10]. Така позиція робить його ключовим носієм соціальної відповідальності та гарантом стійкості рішень.

За висновками глобальних аналітичних звітів, інфраструктурні проєкти належать до секторів з найвищим рівнем ризиків корупції, особливо у країнах із великими потоками державного фінансування [4, 16]. Корупція безпосередньо знищує сталий розвиток, оскільки:

- спотворює конкуренцію,
- збільшує вартість,
- погіршує безпеку,
- підриває довіру інвесторів.

Інженер-консультант, як незалежний представник замовника, є ключовим антикорупційним бар’єром, оскільки:

- здійснює технічний контроль без залежності від підрядника;
- забезпечує прозорість процесів закупівель;
- перевіряє відповідність обсягів і якості робіт;
- веде документацію відповідно до міжнародних практик;
- застосовує цифрові системи контролю та аудит.

Саме тому міжнародні організації, включно зі Світовим банком, ЄБРР та ЄІБ, вимагають обов’язкової участі незалежного інженера у проєктах із високим рівнем інвестицій.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямі.

Проведене дослідження дало змогу комплексно розкрити зміст професії інженера-консультанта та визначити його роль у забезпеченні сталого розвитку інфраструктурних проєктів у межах контрактної моделі FIDIC. Встановлено, що інженер-консультант виступає центральною інституційною фігурою, яка поєднує технічну експертизу, управлінські функції, координацію учасників і забезпечення прозорості процесів. У контрактах FIDIC інженер виконує функції незалежного адміністратора,

відповідального за узгодження інтересів сторін, контроль відповідності рішень та інтеграцію сучасних управлінських підходів у будівельні процеси.

Дослідження узагальнює місце інженера-консультанта у системі сталого розвитку інфраструктурних проєктів. Схема відображає, що інженер-консультант у контрактах FIDIC виконує роль незалежного адміністратора, який забезпечує збалансоване врахування інтересів ключових стейкхолдерів - замовника, підрядника, інвесторів та користувачів інфраструктури. У межах трьох складових сталості – економічної, екологічної та соціальної – інженер формує рішення, спрямовані на управління вартістю та бюджетом, оптимізацію життєвого циклу, прозорість закупівель, зменшення вуглецевого сліду, кліматичну стійкість, застосування nature-positive підходів, а також взаємодію з громадами та ефективний стейкхолдер-менеджмент. Візуальна модель демонструє, що інтеграція цих функцій робить інженера-консультанта ключовою ланкою, відповідальною за узгодженість рішень та забезпечення довготривалої сталості транспортної інфраструктури.

Тому можна зробити висновки, що інженер-консультант забезпечує інтеграцію принципів сталого розвитку на всіх стадіях життєвого циклу транспортного інфраструктурного проєкту – від підготовки та планування до введення об'єкта в експлуатацію. На кожному етапі він виконує різні, але взаємопов'язані функції: формує вимоги до сталості під час передпроєктних досліджень, контролює екологічні, соціальні та економічні параметри в технічних рішеннях на стадії проєктування, забезпечує прозорість та відповідність робіт під час будівництва, а також оцінює довгострокові результати й експлуатаційні ефекти після завершення проєкту. Така послідовна участь інженера-консультанта робить його ключовою фігурою, відповідальною за узгоджене впровадження сталих підходів у дорожньо-мостових проєктах.

Подальший інтерес становить порівняльний аналіз різних контрактних моделей щодо їх здатності забезпечувати сталість інфраструктурних проєктів в Україні.

Перелік посилань

1. Інженер-консультант: суб'єкт господарювання і фахівець. Вісник будівельника, 2018. URL: <http://strategia.gov.ua/wp-content/uploads/2018/05/stattia-inzhener-konsultant.pdf> (дата звернення: 15.11.2025).
2. A Playbook for Nature-Positive Infrastructure Development. Version 1.1. Part of the Sustainable Infrastructure Series. Geneva: FIDIC, WWF, AECOM, 2023. URL: https://www.worldwildlife.org/documents/128/3cv0m8510d_WWF_Playbook_v1_1_Pages_1_.pdf (дата звернення: 15.11.2025).
3. FIDIC Climate Change Charter. Working today for a greener tomorrow. Geneva: FIDIC, 2021. URL: <https://www.cace.cz/wp-content/uploads/2021/11/Climate-Charter-with-Foreword.pdf> (дата звернення: 15.11.2025).
4. State of the World 2023 Update: Corruption, its effects and the need to take action. Geneva: FIDIC, 2023. URL: https://issuu.com/fidic/docs/sotw_2022_corruption_report_update_final (дата звернення: 15.11.2025).
5. Пігуль О. В., Сьомушкін В. О. Інтеграція понять сталого розвитку й управління проєктами в сучасні моделі житлового будівництва. Економіка та суспільство. 2023. Вип. 53. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-53-64> (дата звернення: 15.11.2025).
6. Сердюк В. Р. Післявоєнне відновлення та зростання обсягів будівництва автомобільних доріг. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. № 2. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-177-184> (дата звернення: 15.11.2025).
7. Цифра Т. Ю. Інституційні механізми та фінансові інструменти впровадження відновлюваних джерел енергії при реконструкції житлового фонду. *Економіка та суспільство*. 2025. Вип. 71. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-140> (дата звернення: 15.11.2025).

8. Наказ Міністерства економіки України. 13 січня 2022 року № 108-22. Професійний стандарт. «Інженер-консультант (будівництво)». URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/392-nakaz_108.pdf (дата звернення: 15.11.2025).
9. Infrastructure and Climate Change. Sustainable Infrastructure Series – A Global Leadership Forum Discussion Paper. Geneva: FIDIC, 2023. URL: https://issuu.com/fidic/docs/infrastructure_and_climate_change_july_2023 (дата звернення: 15.11.2025).
10. Closing the Sustainable Infrastructure Gap to Achieve Net Zero. Geneva: FIDIC; EY, 2023. URL: https://issuu.com/fidic/docs/closing_the_sustainable_infrastructure_gap_to_hit ?fr=xKAE9_zU1NQ (дата звернення: 15.11.2025).
11. Закон України «Про архітектурну діяльність» № 687-XIV від 20.05. 1999 року URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/687-14#Text> (дата звернення: 15.11.2025).
12. Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» № 3038-VI від 17 лютого 2011 року URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text> (дата звернення: 15.11.2025).
13. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України станом на листопад 2024. Київська школа економіки. – Київ: KSE, 2025. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf (дата звернення: 15.11.2025).
14. Гаврилов А. В. Інжиніринг та консалтинг у будівництві: категорійно-понятійний аспект, № 13. С. 111–114 - *Інвестиції: практика та досвід*, 2019. URL: <http://www.investplan.com.ua/?op=1&z=6750&i=17> (дата звернення: 15.11.2025).
15. Висновок науково-правової експертизи щодо правового регулювання відносин, пов'язаних із діяльністю інженера-консультанта під час реалізації будівельних проєктів. Київ: Інститут держави і права ім. В. М. Корецького НАН України, 2025. URL: <https://iceg.com.ua/wp-content/uploads/2025/10/Vysnovok-Naukovo-Pravovoi-Ekspertyzy-20.10.2025-A.pdf> (дата звернення: 15.11.2025).
16. Передумови та переваги залучення інженера-консультанта до реалізації будівельних проєктів. Завдання будівельного інжинірингу в процесі відбудови України: Зустріч активу і партнерів МГІК, 5 грудня 2024 р., м. Київ. URL: <https://iceg.com.ua/wp-content/uploads/2025/01/Pro-zaluchennia-IK.pdf> (дата звернення: 15.11.2025).
17. Дружинін М., Іваніна О., Коломієць В., Бубон С. Функціональна координація діяльності консалтингових та інжинірингових компаній із основними зацікавленими сторонами будівельного девелоперського проєкту. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. Вип. 55(1). URL: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).217-229](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).217-229) (дата звернення: 15.11.2025).
18. State of the World 2025: Infrastructure Adaptation for Emerging Economies. FIDIC, 2025. URL: https://issuu.com/fidic/docs/sotw_2025_0919_spread (дата звернення: 15.11.2025).

ANALYSIS OF THE CONSULTANT ENGINEER'S ROLE IN THE FIDIC CONTRACTUAL FRAMEWORK WITHIN THE PARADIGM OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Levishchenko Olena S., PhD in Economics Sciences, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, Associate Professor of the Department of Economics, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3704-5352>

Dziuba Oksana M., PhD in Economics Sciences, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, Associate Professor of the Department of Economics, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2411-5844>

Nyshenko Vladyslav V., Master in Economics Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-6220-640X>

Abstract. The article examines the profession of the consulting engineer within the FIDIC contract model through the lens of the sustainable development concept. It is emphasized that in the context of Ukraine's post-war reconstruction, the role of the consulting engineer is significantly expanding, as this professional acts as an independent institutional actor responsible for coordinating project participants, managing risks, ensuring quality control, and maintaining process transparency. Based on an analysis of regulatory documents, international reports, and scholarly sources, the study identifies the essence of engineering consultancy and outlines the functional duties of the consulting engineer under FIDIC contracts.

The article reveals the nature of sustainable development in the infrastructure sector and identifies its three key pillars: economic, environmental, and social. It is demonstrated that the professional functions of the consulting engineer inherently correspond to each of these components. Economic sustainability is supported through cost and resource management; environmental sustainability—through the implementation of climate-resilient and nature-based solutions; social sustainability—through stakeholder engagement, adherence to safety requirements, and the maintenance of institutional integrity.

It is established that the consulting engineer may be considered a key facilitator and ambassador of sustainable development principles in infrastructure projects, ensuring the durability, efficiency, and safety of investments.

The conducted research provides a comprehensive overview of the consulting engineer's profession and defines their central role in ensuring the sustainable development of infrastructure projects within the FIDIC contract framework. The study finds that the consulting engineer acts as an independent administrative entity combining technical expertise, managerial functions, and stakeholder coordination, thereby ensuring decision coherence and process transparency. The integration of economic, environmental, and social aspects of sustainability throughout all stages of the infrastructure project life cycle positions the consulting engineer as a pivotal element in shaping long-term resilient transport infrastructure. The findings may be used to improve infrastructure project management systems, harmonize national legislation with international standards, and strengthen the professional competencies of consulting engineers.

Keywords: consulting engineer; engineering consulting; sustainability model; road and bridge projects; FIDIC contract model

References

1. Inzhener-konsultant: sub"yekt hospodaryuvannya i fakhivets' (Consulting engineer: business entity and specialist). *Visnyk budiveln'nyka*, 2018. Available at: <http://strategia.gov.ua/wp-content/uploads/2018/05/stattia-inzhener-konsultant.pdf> (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
2. A Playbook for Nature-Positive Infrastructure Development. Version 1.1. Part of the Sustainable Infrastructure Series. Geneva: FIDIC, WWF, AECOM, 2023. URL: https://www.worldwildlife.org/documents/128/3cv0m8510d_WWF_Playbook_v1_1_Pages_1_.pdf (accessed: 15 November 2025). [in English].
3. FIDIC Climate Change Charter. Working today for a greener tomorrow. Geneva: FIDIC, 2021. URL: <https://www.cace.cz/wp-content/uploads/2021/11/Climate-Charter-with-Foreword.pdf> (accessed: 15 November 2025). [in English].
4. State of the World 2023 Update: Corruption, its effects and the need to take action. Geneva: FIDIC, 2023. URL: https://issuu.com/fidic/docs/sotw_2022_corruption_report_update_final (accessed: 15 November 2025). [in English].
5. Pihul O. V., Syomushkin V. O. Intehratsiia poniat' staloho rozvytku y upravlinnia proektamy v suchasni modeli zhytlovoho budivnytstva (Integration of sustainable development concepts and project management in modern housing construction models). *Ekonomika ta suspil'stvo*, 2023, Issue 53. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-53-64> (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
6. Serdiuk V. R. Pislavoiennnie vidnovlennia ta zrostantia obsiahiv budivnytstva avtomobil'nykh dorih (Post-war recovery and growth of road construction volumes). *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*, 2023, No. 2. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-177-184> (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].

7. Tsyfra T. Yu. Instytutsiini mekhanizmy ta finansovi instrumenty vprovadzhennia vidnovliuvanykh dzherel enerhii pry rekonstruksii zhytlovoho fondu (Institutional mechanisms and financial instruments for implementing renewable energy sources in housing stock reconstruction). *Ekonomika ta suspil'stvo*, 2025, Issue 71. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-140> (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
 8. Ministerstvo ekonomiky Ukrainy. *Profesiyni standart "Inzhener-konsultant (budivnytstvo)"* (Professional Standard "Consulting Engineer (Construction)"). Order No. 108-22, 13 January 2022. Available at: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/392-nakaz_108.pdf (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
 9. Infrastructure and Climate Change. Sustainable Infrastructure Series – A Global Leadership Forum Discussion Paper. Geneva: FIDIC, 2023. URL: https://issuu.com/fidic/docs/infrastructure_and_climate_change_july_2023 (accessed: 15 November 2025).
 10. Closing the Sustainable Infrastructure Gap to Achieve Net Zero. Geneva: FIDIC; EY, 2023. URL: https://issuu.com/fidic/docs/closing_the_sustainable_infrastructure_gap_to_hit_?fr=xKAE9_zU1NQ (accessed: 15 November 2025). [in English].
 11. Zakon Ukrainy "Pro arkhitekturnu diial'nist'" № 687-XIV vid 20.05.1999 (Law of Ukraine "On Architectural Activity"). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/687-14#Text> (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
 12. Zakon Ukrainy "Pro rehulivannia mistobudivnoi diial'nosti" № 3038-VI vid 17.02.2011 (Law of Ukraine "On the Regulation of Urban Development"). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text> (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
 13. Zvit pro priami zbytky infrastruktury vid ruinuvan' vnaslidok viiskovoi ahresii rosii proty Ukrainy stanom na lystopad 2024 (Report on direct infrastructure losses due to Russia's military aggression against Ukraine as of November 2024). Kyiv School of Economics, 2025. Available at: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
 14. Havrylov A. V. Inzhynirynh ta konsal'tynh u budivnytstvi: katehoriino-poniatiyni aspekt (Engineering and consulting in construction: categorical-conceptual aspect). *Investysii: praktyka ta dosvid*, 2019, No. 13, pp. 111–114. Available at: <http://www.investplan.com.ua/?op=1&z=6750&i=17> (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
 15. Vysnovok naukovo-pravovoi ekspertyzy shchodo pravovoho rehulivannia vidnosyn, pov'iazanykh iz diial'nistiu inzhenera-konsultanta pid chas realizatsii budivel'nykh proektiv (Scientific and legal expert opinion on regulation of relations related to the consulting engineer's activity during construction project implementation). Kyiv: V. M. Koretsky Institute of State and Law, NAS of Ukraine, 2025. Available at: <https://iceg.com.ua/wp-content/uploads/2025/10/Vysnovok-Naukovo-Pravovoi-Ekspertyzy-20.10.2025-A.pdf> (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
 16. Peredumovy ta perevahy zaluchennia inzhenera-konsultanta do realizatsii budivel'nykh proektiv (Prerequisites and advantages of engaging a consulting engineer in construction project implementation). *Building Engineering Tasks in the Reconstruction of Ukraine*, MGIIK Meeting, Kyiv, 5 December 2024. Available at: <https://iceg.com.ua/wp-content/uploads/2025/01/Pro-zaluchennia-IK.pdf> (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
 17. Druzhynin M., Ivanina O., Kolomiets V., Bubon S. Funktsional'na koordynatsiia diial'nosti konsal'tynhovyykh ta inzhynirynhovyykh kompanii iz osnovnymy za tsikavlenymy storonamy budivel'noho developer'skoho proiektu (Functional coordination of consulting and engineering companies with key stakeholders of a construction development project). *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva*, 2025, Issue 55(1). [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).217-229](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).217-229) (accessed: 15 November 2025). [in Ukrainian].
- State of the World 2025: Infrastructure Adaptation for Emerging Economies. FIDIC, 2025. URL: https://issuu.com/fidic/docs/sotw_2025_0919_spread (accessed: 15 November 2025). [in English]

Дата надходження до редакції 17.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 09.01.2026.

УДК 69.059:005.8:004.942
UDC 69.059:005.8:004.942

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-249-261

ПІДХОДИ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ СТАБІЛЬНОЇ ТА БЕЗПЕРЕРВНОЇ РОБОТИ СИСТЕМИ БУДІВЕЛЬНИХ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ

APPROACHES AND TOOLS FOR MODELING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL MONITORING PROCESSES TO ENSURE STABLE AND CONTINUOUS OPERATION OF BUILDING ENGINEERING NETWORK SYSTEMS



Мартинюк Іван Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерної графіки та дизайну, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: ivan.martinyuk@gmail.com, тел.: +38(096) 068-00-29

<https://orcid.org/0000-0001-7957-2068>



Максим'юк Юрій Всеволодович, професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, e-mail: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua, тел. +38(067) 230-94-72

<https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>



Кузьмінець Микола Петрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: Kuzminecmp@ukr.net, тел.: + +38(098) 360-08-12.

<https://orcid.org/0000-0002-9636-919X>

Анотація. Зростання складності будівельних інженерних мереж, інтеграція підсистем різного функціонального призначення та підвищення вимог до безперервності їх роботи обумовлюють необхідність формування науково обґрунтованої системи організаційно-технологічного спостереження. Ефективне управління експлуатацією мереж водопостачання, тепlopостачання, електропостачання та вентиляції потребує переходу від фрагментарного контролю окремих параметрів до комплексної моделі кількісного оцінювання функціональної стійкості. Методологічну основу становить інтеграція системного, функціонального та ризик-орієнтованого підходів, що дозволяє аналізувати інженерні мережі як цілісний техніко-організаційний комплекс із взаємопов'язаними елементами та ієрархією критичних параметрів. Формалізація процесів спостереження реалізується через побудову інтегрального показника стійкості, який визначається зваженим агрегуванням

нормованих експлуатаційних параметрів і забезпечує об'єктивність порівняльної оцінки різних ділянок мережі. Розрахунок імовірності безвідмовної роботи, інтенсивності відмов та інтегрального ризику дозволяє трансформувати технічні характеристики у вимірювані економічні критерії та формувати пріоритети технічного втручання. Застосування імітаційного моделювання забезпечує сценарний аналіз режимів експлуатації та прогнозування динаміки деградації обладнання за умов варіативного навантаження. Запропоновано інтегральний індекс експлуатаційної ефективності, що поєднує показники стійкості, ризику та стабільності режимів у єдину систему підтримки управлінських рішень. Інтеграція аналітичних моделей у цифрову інформаційну платформу створює завершений контур моніторингу, який забезпечує підвищення надійності функціонування, зниження аварійності, оптимізацію ресурсних витрат та довгострокову стабільність роботи систем будівельних інженерних мереж в умовах динамічного експлуатаційного середовища. Практична реалізація запропонованого інструментарію сприяє формуванню адаптивної моделі управління технічною інфраструктурою на засадах прогнозності, системності та економічної доцільності.

Ключові слова: організаційно-технологічне спостереження, інженерні мережі, інтегральний показник стійкості, моделювання процесів, імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, ризик-аналіз, імітаційне моделювання, цифрова платформа моніторингу, експлуатаційна ефективність, безперервність функціонування.

Вступ. Сучасні системи будівельних інженерних мереж характеризуються зростанням складності структури, підвищенням рівня інтеграції підсистем та посиленням вимог до безперервності їх функціонування. Забезпечення стабільної роботи мереж водопостачання, теплопостачання, електропостачання та вентиляції набуває стратегічного значення для підтримання експлуатаційної надійності об'єктів інфраструктури. Традиційні методи технічного контролю, що базуються на періодичних перевірках окремих параметрів, не забезпечують системної оцінки динаміки стану мережі. У цих умовах актуальним є впровадження організаційно-технологічного спостереження, яке поєднує аналітичні моделі, ризик-орієнтовані методи оцінювання та цифрові інструменти моніторингу. Формалізація процесів спостереження дозволяє перейти до інтегрованої системи підтримки прийняття управлінських рішень і забезпечити довгострокову функціональну стійкість інженерних систем.

Метою роботи є розроблення методологічних підходів та інструментарію моделювання процесів організаційно-технологічного спостереження, спрямованих на забезпечення стабільної та безперервної роботи систем будівельних інженерних мереж, шляхом формалізації інтегральних показників стійкості, надійності та ризику, а також інтеграції аналітичних і імітаційних моделей у цифрове інформаційне середовище підтримки управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу. Сучасна практика експлуатації будівельних об'єктів характеризується ускладненням структури інженерних мереж і зростанням вимог до їхньої надійності, енергоефективності та безперервності функціонування. У таких умовах організаційно-технологічне спостереження набуває стратегічного значення, оскільки забезпечує систематизований контроль технічного стану мереж водопостачання, теплопостачання, електропостачання, вентиляції та інших підсистем. Моніторинг розглядається як безперервний цикл збору, аналізу й інтерпретації експлуатаційних параметрів із подальшим управлінським реагуванням.

Теоретичною основою моделювання процесів спостереження є інтеграція системного, функціонального та ризик-орієнтованого підходів. Системний підхід дозволяє аналізувати інженерні мережі як комплекс взаємопов'язаних елементів із визначенням структурних і функціональних залежностей між ними. Функціональний аспект зосереджується на регламентації процедур контролю, діагностики та технічного обслуговування. Ризик-орієнтований компонент передбачає виявлення потенційно небезпечних зон, оцінювання імовірності відмов та визначення критичних параметрів, що впливають на стійкість функціонування системи.

Інструментальна база моделювання включає аналітичні, імітаційні та цифрові інформаційні моделі. Аналітичні моделі описують закономірності зміни технічних показників у часі та дозволяють встановлювати граничні стани експлуатації. Імітаційне моделювання забезпечує відтворення

поведінки мережі за варіативних режимів навантаження або аварійних впливів. Цифрові моделі інтегрують дані сенсорного контролю, результати технічних обстежень і статистику відмов, формуючи основу для прогнозної аналітики та оперативного прийняття управлінських рішень [1].

На рисунку 1 подано структуровану блок-схему, яка відображає послідовність основних етапів — від визначення цілей контролю та збору експлуатаційних даних до аналітичної обробки інформації, оцінювання ризиків і реалізації управлінських рішень із забезпеченням зворотного зв'язку.

Практичне впровадження зазначених підходів передбачає створення інтегрованих цифрових платформ, які забезпечують акумулювання та синхронізацію даних у реальному часі. Використання дистанційного контролю, інтелектуальних алгоритмів аналізу та концепції цифрового відображення інженерних систем дозволяє підвищити точність прогнозування та знизити імовірність аварійних ситуацій. Автоматизація процедур моніторингу мінімізує вплив суб'єктивних факторів і забезпечує оперативність реагування.



Рисунок 1 – Схема організаційно-технологічного моніторингу інженерних мереж

Джерело: розроблено автором на основі [1]

Figure 1 – Scheme of Organizational and Technological Monitoring of Engineering Networks

Source: developed by the author based on [1]

Комплексне поєднання методологічних підходів і сучасного інструментарію моделювання формує науково обґрунтовану основу для забезпечення стабільної та безперервної роботи систем будівельних інженерних мереж. Формалізація процесів спостереження сприяє підвищенню експлуатаційної надійності, оптимізації ресурсних витрат і забезпеченню довгострокової функціональної стійкості інфраструктурних об'єктів.

Формалізація параметрів стійкості функціонування інженерних мереж у межах організаційно-технологічного спостереження передбачає побудову узагальненого кількісного критерію, здатного

інтегрувати різномірні експлуатаційні показники в єдину аналітичну систему оцінювання [2]. Такий підхід забезпечує перехід від фрагментарного контролю окремих технічних параметрів до системного аналізу динаміки стану мережі як цілісного інженерного комплексу. Інтегральна оцінка дозволяє оперативно ідентифікувати зони зниження стабільності, встановлювати пріоритети технічного обслуговування та формувати превентивні управлінські рішення.

Базовим елементом моделі виступає інтегральний показник функціональної стійкості, який визначається як зважена сума нормованих параметрів:

$$S_f = \sum_{i=1}^n w_i \times x_i, \quad (1)$$

де w_i — ваговий коефіцієнт значущості i -го параметра ($\sum w_i = 1$),
 x_i — нормоване значення відповідного показника.

Нормування здійснюється відносно допустимого інтервалу зміни параметра:

$$x_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (2)$$

де X_i — фактичне значення,
 $X_{\min}, X_{\max}$ — гранично допустимі межі.

Для показників, зростання яких є негативним (наприклад, втрати ресурсу), використовується інверсна форма нормування.

Розрахунковий приклад. Для контрольної ділянки теплової мережі зафіксовано такі дані: тиск — 0,38 МПа (допустимо 0,30–0,45 МПа), температура — 62 °С (55–70 °С), електричне навантаження — 118 кВт (100–140 кВт), питомі втрати — 12 % (5–15 %). Вагові коефіцієнти відповідно: 0,30; 0,25; 0,25; 0,20.

Обчислення нормованих значень:

$$x_{\text{тиск}} = \frac{0,38 - 0,30}{0,45 - 0,30} = 0,53.$$

$$x_{\text{тем}} = \frac{62 - 55}{70 - 55} = 0,47.$$

$$x_{\text{навантаж}} = \frac{118 - 100}{140 - 100} = 0,45.$$

$$x_{\text{втрати}} = \frac{15 - 12}{15 - 5} = 0,30.$$

Інтегральний показник:

$$S_f = 0,30 \times 0,53 + 0,25 \times 0,47 + 0,25 \times 0,45 + 0,20 \times 0,30 = 0,45.$$

Отримане значення 0,45 свідчить про зниження рівня функціональної стійкості та необхідність коригувальних заходів.

У таблиці 1 наведено поетапний розрахунок інтегрального показника функціональної стійкості із деталізацією вагових коефіцієнтів, нормованих параметрів та їх внеску в узагальнений результат [3].

Таблиця 1 - Розрахунок інтегрального показника функціональної стійкості
Table 1 - Calculation of the Integral Indicator of Functional Stability

Параметр	Фактичне значення	Допустимий інтервал	Вага w_i	Нормоване x_i	Внесок $w_i x_i$
Тиск, МПа	0,38	0,30–0,45	0,30	0,53	0,159
Температура, °C	62	55–70	0,25	0,47	0,118
Навантаження, кВт	118	100–140	0,25	0,45	0,113
Питомі втрати, %	12	5–15	0,20	0,30	0,060
Разом	—	—	1,00	—	0,450

Джерело: розроблено автором на основі [3]

Source: developed by the author based on [3]

Оцінювання інтегральної стійкості доцільно доповнювати аналізом надійності окремих елементів мережі. Ймовірність безвідмовної роботи в часі визначається експоненційною залежністю:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

де λ — інтенсивність відмов,

t — час експлуатації.

Середній напрацювання до відмови:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}, \quad (4)$$

Якщо $\lambda=0,0015$ год⁻¹, тоді

$$T_{cp} = \frac{1}{0,0015} = 666,7 \text{ год.}$$

Для горизонту 200 год:

$$P(200) = e^{-0,0015 \times 200} = e^{-0,3} \approx 0,74.$$

Отже, імовірність безвідмовної роботи становить 74 %, що нижче нормативного рівня 80 %, і вимагає перегляду інтервалів технічного обслуговування.

На рисунку 2 відображено графічну залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу експлуатації, що ілюструє динаміку зниження надійності елементів інженерної мережі [4].

Графічна інтерпретація демонструє експоненційне зниження надійності, що підкреслює необхідність превентивної стратегії управління ресурсом обладнання.

Для аналізу стабільності режимів роботи використовується коефіцієнт варіації навантаження:

$$V = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (5)$$

де μ — середнє значення навантаження, σ — стандартне відхилення.

За умови $\mu=120$ кВт та $\sigma=18$ кВт:

$$V = \frac{18}{120} = 0,15..$$

Значення 0,15 свідчить про відносно стабільний режим функціонування; перевищення 0,25 вказувало б на ризик прискореної деградації елементів мережі [5].

На рисунку 3 представлено часові коливання навантаження мережі та визначення коефіцієнта варіації як індикатора стабільності режимів функціонування.

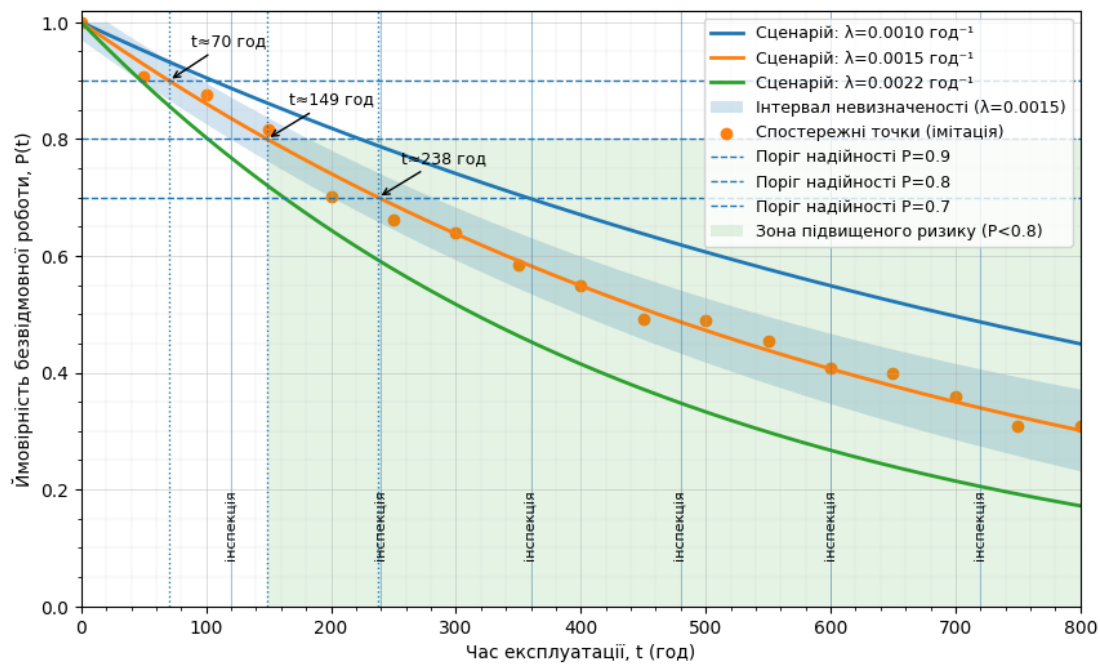


Рисунок 2 – Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ від часу експлуатації
Джерело: розроблено автором на основі [4]

Figure 2 – Graph of the Dependence of the Probability of Failure-Free Operation $P(t)$ on Operating Time

Source: developed by the author based on [4]

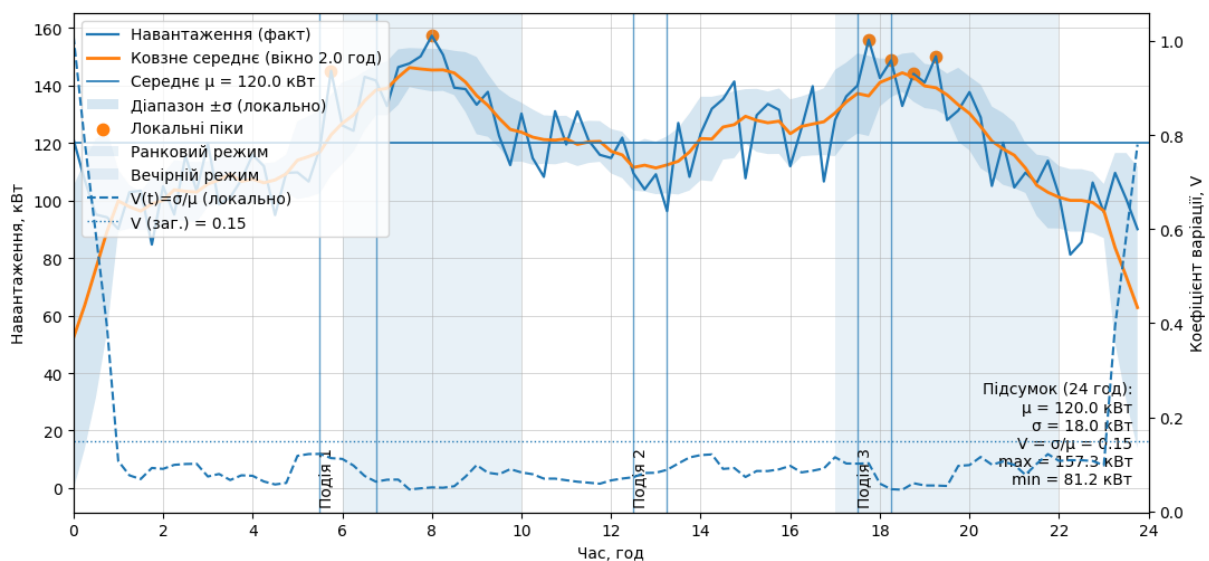


Рисунок 3 – Графік часових коливань навантаження та визначення коефіцієнта варіації
Джерело: розроблено автором на основі [5]

Figure 3 – Graph of Load Fluctuations Over Time and Determination of the Coefficient of Variation
Source: developed by the author based on [5]

Поєднання інтегральної оцінки S_f , показника надійності $P(t)$ та коефіцієнта варіації V формує узгоджену систему кількісних критеріїв організаційно-технологічного моніторингу. Отримані

результати забезпечують обґрунтоване планування технічного обслуговування, оптимізацію режимів експлуатації та підтримання безперервності функціонування інженерних мереж.

Імітаційне моделювання режимів експлуатації інженерних мереж є логічним розвитком аналітичної формалізації, оскільки дозволяє відтворити поведінку системи в умовах змінного навантаження, структурних збурень та аварійних впливів. Якщо інтегральні показники відображають поточний стан, то імітаційні моделі дають можливість оцінити траєкторію розвитку подій у часі та кількісно визначити рівень ризику відмов [6]. У межах організаційно-технологічного спостереження це створює основу для сценарного прогнозування та адаптивного управління.

Формалізація ризику відмов окремого елемента або вузла мережі доцільно здійснювати через інтегральний показник ризику:

$$R = P_f \times C, \quad (6)$$

де P_f — імовірність відмови,

C — величина наслідків (економічних, технологічних або соціальних втрат).

Імовірність відмови визначається як доповнення до ймовірності безвідмовної роботи:

$$P_f = 1 - P(t), \quad (7)$$

Розрахунковий приклад. Якщо для вузла розподілу теплової мережі за горизонту 300 год експлуатації отримано $P(t)=0,70$, тоді:

$$P_f = 1 - 0,70 = 0,30.$$

За умови, що потенційні втрати при відмові оцінюються у 250 тис. грн, інтегральний ризик становитиме:

$$R = 0,30 \times 250000 = 75000 \text{ грн.}$$

Отримане значення може використовуватися як критерій пріоритезації ремонтних заходів або резервування потужностей.

Узагальнення розрахункових показників імовірності відмов, величини наслідків та інтегрального ризику для ключових елементів інженерної мережі доцільно представити у таблиці 2, що забезпечує можливість їх порівняльного аналізу та ранжування за рівнем критичності [7].

Таблиця 2 - Оцінювання ризику відмов ключових елементів мережі

Table 2 - Assessment of Failure Risk of Key Network Elements

Елемент мережі	$P(t)$	P_f	Наслідки, грн	Ризик R, грн
Насосний агрегат	0,74	0,26	180 000	46 800
Теплообмінник	0,70	0,30	250 000	75 000
Електроцит керування	0,82	0,18	120 000	21 600

Джерело: розроблено автором на основі [7]

Source: developed by the author based on [7]

Ранжування за величиною R демонструє, що найбільш критичним є теплообмінник, що обґрунтовує доцільність посиленого моніторингу або модернізації цього вузла.

На рисунку 4 представлено діаграму порівняльної оцінки інтегрального ризику відмов елементів мережі, що дозволяє візуально ідентифікувати найбільш критичні вузли системи.

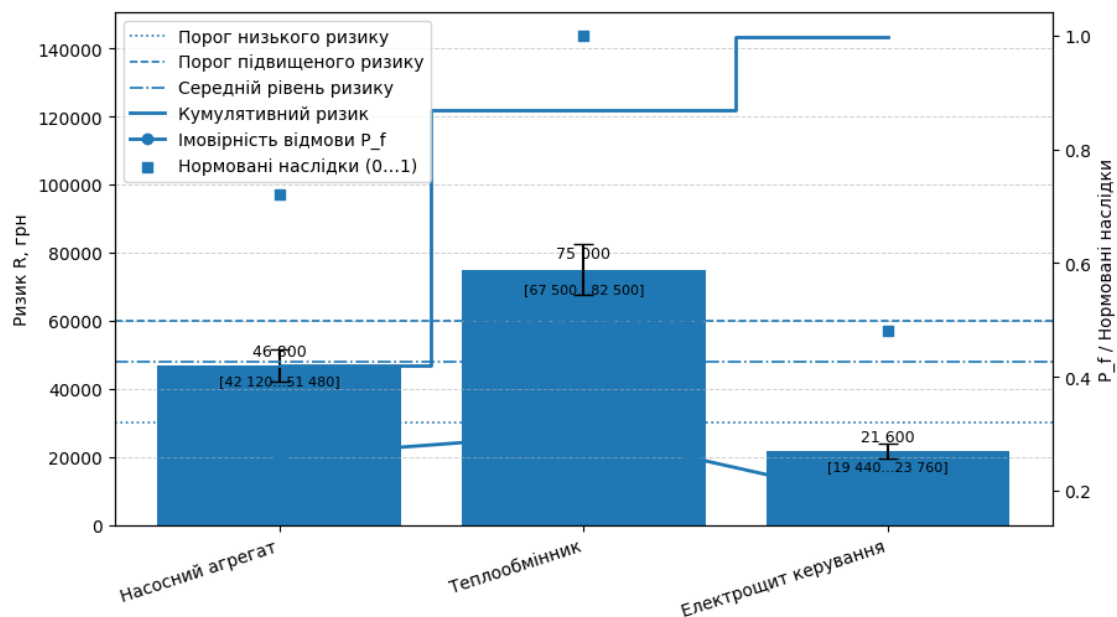


Рисунок 4 – Діаграма порівняльної оцінки інтегрального ризику відмов елементів мережі
Джерело: розроблено автором на основі [8]

Figure 4 – Comparative Diagram of the Integral Failure Risk Assessment of Network Elements
Source: developed by the author based on [8]

Сценарний аналіз передбачає моделювання декількох режимів експлуатації: стабільного, перевантаженого та аварійного. У межах імітаційної моделі змінними параметрами виступають інтенсивність відмов, коефіцієнт варіації навантаження та тривалість міжсервісних інтервалів. Моделювання показує, що при збільшенні коефіцієнта варіації навантаження з 0,15 до 0,28 інтенсивність відмов умовно зростає з 0,0015 до 0,0022 год⁻¹, що призводить до скорочення середнього напрацювання до відмови приблизно на 32 %. Це підтверджує прямий зв'язок між нестабільністю режимів та деградацією обладнання.

На рисунку 5 відображено графік зміни рівня ризику при різних сценаріях навантаження, який демонструє динамічну залежність критичності функціонування мережі від режимів експлуатації.

Аналіз кривих показує, що перевантажений режим формує нелінійне зростання ризику, тоді як стабільний режим характеризується відносно пологим трендом. Аварійний сценарій демонструє різке збільшення значення R, що перевищує допустимі порогові рівні вже на ранніх етапах експлуатації [9].

Для інтеграції результатів імітаційного моделювання в систему управління доцільно застосовувати матрицю «ймовірність–наслідки», яка дозволяє класифікувати події за рівнями критичності (низький, середній, високий ризик). Такий підхід забезпечує трансформацію аналітичних результатів у конкретні управлінські рішення: резервування обладнання, корекцію режимів, перегляд графіків технічного обслуговування або впровадження додаткових засобів контролю.

Імітаційне моделювання режимів експлуатації та оцінювання ризиків формує динамічний контур організаційно-технологічного спостереження. Воно дозволяє не лише фіксувати поточний стан мережі, а й прогнозувати потенційні відхилення, визначати економічно обґрунтовані пріоритети втручання та забезпечувати безперервність функціонування інженерних систем в умовах змінного навантаження.

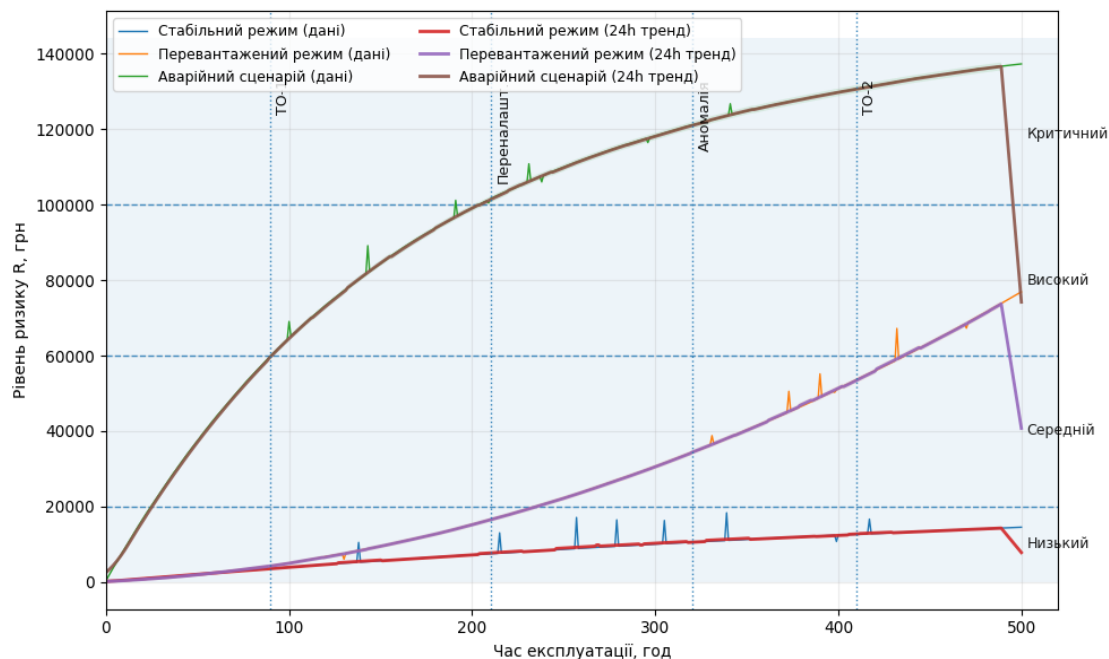


Рисунок 5 – Графік зміни рівня ризику при варіативних сценаріях навантаження
Джерело: розроблено автором на основі [9]

Figure 5 – Graph of Changes in Risk Level Under Variable Load Scenarios
Source: developed by the author based on [9]

Аналітико-цифровий інструментарій підтримки управлінських рішень у системі організаційно-технологічного спостереження формує завершальний контур інтеграції розрахункових показників, імітаційних сценаріїв та експлуатаційних даних у єдине інформаційне середовище. Його призначення полягає не лише в акумулюванні даних моніторингу, а й у трансформації масиву вимірювань у керовані індикатори ефективності, що дозволяють оперативно коригувати режими функціонування інженерних мереж. Такий підхід реалізується через створення цифрової платформи, яка поєднує сенсорні дані, розрахункові моделі та алгоритми прогнозу аналітики.

Базовим інструментом цифрової підтримки є агрегований індекс експлуатаційної ефективності, який інтегрує показники стійкості, ризику та ресурсної оптимальності. Узагальнену форму такого індексу доцільно представити як:

$$E_{int} = \alpha S_f + \beta(1 - P_f) + \gamma(1 - V), \quad (8)$$

де S_f — інтегральний показник функціональної стійкості, P_f — імовірність відмови, V — коефіцієнт варіації навантаження, α, β, γ — вагові коефіцієнти ($\alpha + \beta + \gamma = 1$).

Розрахунковий приклад. Нехай $S_f = 0,45$, $P_f = 0,30$, $V = 0,15$. За умов ваг $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,35$, $\gamma = 0,25$:

$$E_{int} = 0,4 \times 0,45 + 0,35 \times (1 - 0,30) + 0,25 \times (1 - 0,15).$$

$$E_{int} = 0,18 + 0,245 + 0,2125 = 0,6375.$$

Отримане значення 0,64 може трактуватися як середній рівень експлуатаційної ефективності, що вимагає оптимізації окремих параметрів, але не свідчить про критичний стан системи.

Цифрова платформа моніторингу дозволяє візуалізувати динаміку інтегрального індексу в часовому розрізі та визначати тренди деградації або стабілізації режимів.

На рисунку 6 представлено графічну інтерпретацію динаміки інтегрального індексу експлуатаційної ефективності E_{int} у часовому розрізі, що дозволяє оцінити тенденції зміни стану інженерної мережі та своєчасно ідентифікувати моменти зниження функціональної стабільності [10].

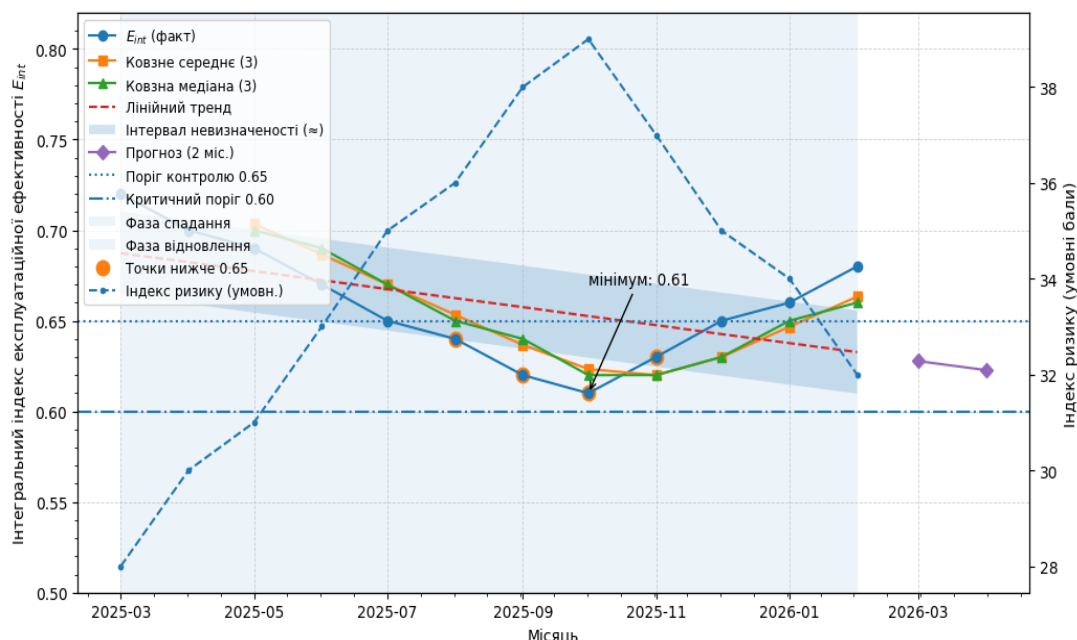


Рисунок 6 – Графік динаміки інтегрального індексу експлуатаційної ефективності E_{int}

Джерело: розроблено автором на основі [10]

Figure 6 – Graph of the Dynamics of the Integral Operational Efficiency Index E_{int}

Source: developed by the author based on [10]

Аналіз тренду дозволяє встановити точки перегину, що сигналізують про необхідність управлінського втручання. Зниження індексу нижче встановленого порогового значення (наприклад, 0,60) може автоматично ініціювати процедуру перевірки відповідного вузла або запуск алгоритму прогностичного технічного обслуговування [11].

У таблиці 3 наведено узагальнену матрицю прийняття управлінських рішень, яка поєднує значення інтегрального індексу експлуатаційної ефективності та рівень ризику відмов, формуючи обґрунтовану основу для визначення пріоритетності технічних і організаційних заходів.

Додатковим інструментом цифрової аналітики є прогнозування ресурсу елементів мережі на основі трендової моделі. У спрощеному вигляді залишковий ресурс можна визначити як:

$$T_{zal} = \frac{S_{crit} - S_{fact}}{k_{deg}}, \quad (9)$$

де S_{crit} — критичний рівень показника стійкості,

S_{fact} — поточне значення,

k_{deg} — коефіцієнт швидкості деградації.

Наприклад, якщо критичний рівень прийнято 0,30, поточний — 0,45, а швидкість зниження становить 0,01 за місяць, то:

$$T_{\text{зал}} = \frac{0,45 - 0,30}{0,01} = 15 \text{ місяців.}$$

Це дозволяє планувати модернізацію або заміну обладнання з урахуванням фактичної динаміки стану.

Таблиця 3 – Матриця прийняття управлінських рішень за рівнем ефективності та ризику
Table 3 – Decision-Making Matrix Based on Efficiency and Risk Levels

E_{int}	Ризик R	Рівень стану	Управлінське рішення
> 0,75	Низький	Стабільний	Плановий моніторинг
0,60–0,75	Середній	Контрольований	Поглиблена діагностика
< 0,60	Високий	Критичний	Негайне технічне втручання

Джерело: розроблено автором на основі [11]

Source: developed by the author based on [11]

Аналітико-цифровий інструментарій забезпечує завершення циклу організаційно-технологічного спостереження: від збору та обробки даних до формування кількісно обґрунтованих управлінських рішень. Інтеграція розрахункових моделей, ризик-аналізу та цифрової візуалізації дозволяє підвищити прозорість управління, мінімізувати ймовірність аварій та забезпечити стабільну і безперервну роботу систем будівельних інженерних мереж у довгостроковій перспективі [12].

Висновки. Проведення дослідження дозволило сформулювати цілісну методологічну основу моделювання процесів організаційно-технологічного спостереження за функціонуванням систем будівельних інженерних мереж. У межах викладу було обґрунтовано необхідність переходу від фрагментарного контролю окремих технічних параметрів до інтегрованої системи кількісної оцінки, яка поєднує показники стійкості, надійності, ризику та варіативності експлуатаційних режимів.

Запропонований підхід базується на формалізації інтегрального показника функціональної стійкості, що дозволяє агрегувати різноманітні параметри в єдину аналітичну шкалу та забезпечити об'єктивність порівняльної оцінки різних ділянок мережі. Поєднання нормування показників із розрахунком імовірності безвідмовної роботи створює підґрунтя для кількісного визначення технічного ресурсу обладнання та прогнозування моментів потенційної деградації.

Імітаційне моделювання режимів експлуатації розширює аналітичну базу за рахунок врахування сценарної варіативності та впливу нестабільних навантажень на інтенсивність відмов. Оцінювання ризику як добутку імовірності відмови на величину можливих наслідків дозволяє трансформувати технічні показники у вимірювані економічні критерії, що підвищує обґрунтованість управлінських рішень і забезпечує раціональний розподіл ресурсів.

Інтеграція розрахункових моделей у цифрове інформаційне середовище формує завершений контур підтримки прийняття рішень. Використання агрегованих індексів ефективності, матриць оцінювання стану та прогнозування залишкового ресурсу забезпечує перехід до адаптивної моделі управління, в якій моніторинг виступає не лише засобом фіксації відхилень, а інструментом стратегічного планування розвитку інженерної інфраструктури.

Загалом поєднання системного підходу, математичної формалізації, імітаційного аналізу та цифрової аналітики формує науково обґрунтовану концепцію забезпечення стабільної та безперервної роботи будівельних інженерних мереж. Реалізація запропонованого інструментарію сприяє підвищенню експлуатаційної надійності, зниженню аварійності, оптимізації витрат на технічне обслуговування та створенню умов для довгострокової стійкості функціонування інженерних систем у динамічному середовищі.

Список посилань

1. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Kahlen F.-J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.). *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
2. Cinelli M., Spada M., Kim W., Zhang Y., Burgherr P. MCDA Index Tool: an interactive software to develop indices and rankings // *Environment Systems and Decisions*. — 2020. — Vol. 1. — P. 82–109. — DOI: 10.1007/s10669-020-09784-X.
3. Saaty T. L. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. 2nd ed. Pittsburgh: *RWS Publications*, 2008. 315 p. ISBN 978-0-9620317-8-6.
4. Rausand M., Høyland A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. 636 p.
5. Теорія ймовірностей. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, О.В. Свинчук. — Електронні текстові дані (1 файл: 3705 Кбайт). — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 193 с.
6. Banks J., Carson J. S., Nelson B. L., Nicol D. M. Discrete-event system simulation. 5th ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010. 640 p. ISBN 978-0-13-606212-7.
7. Aven T. Risk analysis: assessing uncertainties beyond expected values and probabilities. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 192 p. ISBN 978-1-118-90504-5.
8. Modarres M., Kaminskiy M., Krivtsov V. Reliability engineering and risk analysis: a practical guide. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 515 p. ISBN 978-1-4987-6001-2.
9. Law A. M. Simulation modeling and analysis. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. 744 p. ISBN 978-0-07-340132-4.
10. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. — P. 1483–1510. — DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
11. Hopkin P. Fundamentals of risk management: understanding, evaluating and implementing effective risk management. 4th ed. — London: Kogan Page, 2018. — 456 p. — ISBN 978-0-7494-8357-2.
12. Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. Remaining useful life estimation — A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 213, No. 1. — P. 1–14. — DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.

APPROACHES AND TOOLS FOR MODELING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL MONITORING PROCESSES TO ENSURE STABLE AND CONTINUOUS OPERATION OF BUILDING ENGINEERING NETWORK SYSTEMS

Martyniuk Ivan Yu., PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Engineering Graphics and Design, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: ivan.martinyuk@gmail.com, tel. +38(096) 068-00-29, <https://orcid.org/0000-0001-7957-2068>

Maksymiuk Yurii V., Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structural Mechanics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua, tel. +38(067) 230-94-72, <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>

Kuzminets Mykola P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Engineering Graphics and Design, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: Kuzminecmp@ukr.net, tel. +38(098) 360-08-12, <https://orcid.org/0000-0002-9636-919X>

Abstract. The increasing complexity of building engineering networks, integration of subsystems with different functional purposes, and growing requirements for uninterrupted operation necessitate the development of a scientifically grounded system of organizational and technological monitoring. Effective management of water supply, heat supply, power supply, and ventilation networks requires a transition from fragmented control of individual parameters to a comprehensive model for quantitative assessment of functional stability. The methodological framework is based on the integration of systemic, functional, and risk-oriented approaches, enabling the analysis of engineering networks as an integrated technical and organizational complex with interrelated elements and a hierarchy of critical parameters.

Formalization of monitoring processes is implemented through the construction of an integral stability indicator determined by weighted aggregation of normalized operational parameters, ensuring objectivity in comparative assessment of different network sections. Calculation of the probability of failure-free operation, failure rate, and integral risk makes it possible to transform technical characteristics into measurable economic criteria and to establish priorities for technical intervention. The application of simulation modeling provides scenario-based analysis of operating modes and forecasting of equipment degradation dynamics under variable load conditions.

An integral operational efficiency index combining stability indicators, failure probability, and load variability into a unified decision-support system is proposed. Integration of analytical models into a digital information platform forms a comprehensive monitoring loop that enhances operational reliability, reduces accident rates, optimizes maintenance costs, and ensures long-term stability of building engineering network systems under dynamic operating conditions. Practical implementation of the proposed tools contributes to the formation of an adaptive infrastructure management model based on predictability, systemic coordination, and economic feasibility.

Keywords: organizational and technological monitoring, engineering networks, integral stability indicator, process modeling, probability of failure-free operation, failure rate, risk analysis, simulation modeling, digital monitoring platform, operational efficiency, continuity of operation.

References

1. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: Kahlen F.-J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.). *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
2. Cinelli M., Spada M., Kim W., Zhang Y., Burgherr P. MCDA Index Tool: an interactive software to develop indices and rankings. *Environment Systems and Decisions*. 2020. Vol. 40. P. 82–109. DOI: 10.1007/s10669-020-09784-X.
3. Saaty T. L. *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. 2nd ed. Pittsburgh: RWS Publications, 2008. 315 p. ISBN 978-0-9620317-8-6.
4. Rausand M., Høyland A. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. 636 p.
5. Barabash O. V., Musiienko A. P., Svyinchuk O. V. *Probability Theory: Study Guide for Students of Specialty 121 “Software Engineering”* [Electronic resource]. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021. 193 p. [in Ukrainian]
6. Banks J., Carson J. S., Nelson B. L., Nicol D. M. *Discrete-Event System Simulation*. 5th ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010. 640 p. ISBN 978-0-13-606212-7.
7. Aven T. *Risk Analysis: Assessing Uncertainties Beyond Expected Values and Probabilities*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 192 p. ISBN 978-1-118-90504-5.
8. Modarres M., Kaminskiy M., Krivtsov V. *Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 515 p. ISBN 978-1-4987-6001-2.
9. Law A. M. *Simulation Modeling and Analysis*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. 744 p. ISBN 978-0-07-340132-4.
10. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
11. Hopkin P. *Fundamentals of Risk Management: Understanding, Evaluating and Implementing Effective Risk Management*. 4th ed. London: Kogan Page, 2018. 456 p. ISBN 978-0-7494-8357-2.
12. Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. Remaining useful life estimation — a review on the statistical data-driven approaches. *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 213, No. 1. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.

Дата надходження до редакції 08.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 03.03.2026.

УДК 625.8.08:519.8
UDC 625.8.08:519.8

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-262-272

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ ПІСЛЯ ЗИМИ ТА ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

MATHEMATICAL METHODS FOR ASSESSING RESIDUAL LIFE OF ROAD PAVEMENTS AFTER WINTER



Мозговий Володимир Васильович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри дорожньо-будівельних матеріалів та хімії, Національний транспортний університет, к. 109, вул. Бойчука 42, Київ, Україна, 01103, e-mail: mozgoviy@gmail.com.

<https://orcid.org/0000-0002-1032-8048>



Левківська Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Національний транспортний університет, к. 514, вул. Бойчука 42, Київ, Україна, 01103, e-mail: l.v.g.ntu@gmail.com.

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



Шевчук Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Національний транспортний університет, к. 511, вул. Бойчука 42, Київ, Україна, 01103, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com.

<https://orcid.org/0000-0002-5748-9527>



Фещенко Анна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: fanna17@ukr.net, тел. +380677441754

<https://orcid.org/0000-0002-8212-5362>

Анотація. У статті науково обґрунтовано математичні методи оцінки залишкового ресурсу нежорсткого дорожнього одягу України після екстремальних зимових навантажень. Автори аналізують комплекс деструктивних чинників: несприятливий клімат, хронічне недофінансування та порушення технологічних норм. Особливу увагу приділено дефіциту бюджетних асигнувань під час воєнного стану, що унеможливило планові ремонти та призводить до лавиноподібної деградації стратегічних об'єктів транспортної мережі в умовах зміни логістичних маршрутів.

У межах дослідження розширено механізми термічного впливу на дорожні матеріали через призму теорії термомеханіки багат шарових середовищ та процесів гідротермічного розклинювання покриттів. На основі математичної залежності між напружено-деформованим станом конструкції та показником довговічності за законом Пальмгрена-Майнера, виявлено критичну невідповідність між застарілими розрахунковими нормами (6-10 т на вісь) та сучасними стандартами навантаження (11,5-13 т). Доведено, що така диспропорція провокує прискорене вичерпання ресурсу дорожнього одягу у 4-7,5 рази, фактично нівелюючи запас міцності конструкцій. Шляхом застосування чисельних методів моделювання та обробки даних інструментальних обстежень, поточний стан мережі доріг визначено як граничний (1,55-2,45 бали), що потребує негайного наукового втручання.

У роботі критично оцінено практику ямкового ремонту як тимчасового заходу. Автори наголошують, що ефективність локального відновлення є низькою без врахування функції релаксації асфальтобетону та оптимізації реологічних властивостей сумішей. Теоретично обґрунтовано економічну недоцільність латання вибоїн при перевищенні порогу відносної площі деструкції у 30%. Подолання цієї межі свідчить про втрату тримальної здатності та необхідність капітального відновлення.

Стаття пропонує перехід до цифрових інструментів моніторингу через створення прикладних інженерних методик. Подальші дослідження будуть спрямовані на аналіз явища гідротермічного розклинювання та розробку прогнозних таблиць залишкового ресурсу на основі уточненого закону Пальмгрена-Майнера для великовагового транспорту. Окремим напрямком є підвищення енергоефективності через використання домішок для низькотемпературного укладання асфальту. Реалізація цих кроків дозволить трансформувати математичне моделювання у практичний інструмент моніторингу та забезпечить інтеграцію інфраструктури України у єдину європейську цифрову мережу.

Ключові слова: дорожнє покриття, залишковий ресурс, математичне моделювання, ямковий ремонт, деструкція, асфальтобетон, експлуатаційна придатність.

Вступ. Сучасний етап розвитку транспортної інфраструктури України проходить в умовах безпрецедентних викликів. Критичний стан дорожніх покриттів, зумовлений поєднанням природно-кліматичних факторів та стрімкого зростання експлуатаційних навантажень, вимагає переосмислення традиційних підходів до їх утримання. Невідповідність більшої частини мережі доріг, що будувалася за нормативами минулого століття (розрахованими на 6-10 т на вісь), сучасним європейським вимогам щодо руху великовагового транспорту (11,5-13 т на вісь) призводить до експоненціального зростання деструктивних процесів. Ситуація значно ускладнюється наслідками суворих зимових періодів, коли гідротермічний вплив спричиняє передчасну втрату тримальної здатності дорожнього одягу.

В умовах воєнного стану та дефіциту бюджетних асигнувань виникає гостра потреба у впровадженні математичних методів оцінки залишкового ресурсу. Це дозволить перейти від стратегії «реагування на руйнування» до науково обґрунтованого прогнозування технічного стану об'єктів. Актуальність дослідження підсилюється необхідністю інтеграції української транспортної мережі в європейські логістичні коридори, що неможливо без забезпечення належної експлуатаційної придатності покриттів.

Аналіз останніх досліджень. Питання оцінки довговічності та деградації дорожніх покриттів активно вивчаються у світовій науковій спільноті. В. Мозговий (2024) спільно з колегами досліджує особливості напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянках підйомів та спусків, що є критичним для розуміння процесів деструкції під дією поздовжніх сил. Важливий внесок у підвищення експлуатаційних характеристик асфальтобетону через математичне обґрунтування армування сумішей синтетичними волокнами та аналіз якості адгезії між шарами зроблено у працях (Л. Левківська, 2023; Л. Левківська та ін., 2022).

Стратегічні аспекти планування відновлення дорожньої мережі в кризових умовах та методологія оцінки експлуатаційної надійності автомобільних доріг при підвищених осьових навантаженнях детально висвітлені у дослідженнях (В. Савенко та М. Кулик, 2021; В. Савенко та О. Ткачук, 2022). Інноваційні підходи до проєктування асфальтобетонних покриттів з високим

рівнем навантаження представлені у працях О. Онищенко (2022). Математичне моделювання впливу кліматичних чинників на деградацію інфраструктури запропоновано (І. Гамеляк 2022; І. Гамеляк та М. Дмитрієв 2023).

Світовий досвід імовірнісного моделювання зносу та підвищення тріщиностійкості розглянуто в публікаціях (A. Cannone Falchetto & D. Wang, 2021; R. Smith, 2021). Питання гідротермічної стабільності та нелінійного накопичення пошкоджень обґрунтовано в статтях (X. Chen & Y. Liu, 2023; Q. Liu & H. Wang, 2022). Економічні аспекти стратегій утримання доріг та оптимізацію витрат в умовах воєнного стану проаналізовано (A. Bezuglyi, 2021; O. Tkachuk, 2024).

Математичне моделювання взаємодії великовагових транспортних засобів із дорожньою структурою представлено у дослідженні О. Онищенко та В. Федоренко (2023). Попри значний масив наукових напрацювань, питання адаптації прогнозних моделей зносу дорожнього покриття до емпіричних даних після екстремальних зимових періодів в умовах України потребує подальшого системного вивчення.

Мета дослідження - розробка та наукове обґрунтування математичних методів оцінки залишкового ресурсу дорожніх покриттів після зимового періоду експлуатації для оптимізації стратегій їх відновлення в умовах інтенсивних транспортних навантажень.

Виклад основного матеріалу. Дане дослідження базується на поєднанні методів математичного моделювання, теорії надійності інженерних конструкцій, статистичного аналізу експлуатаційних параметрів автомобільних доріг та методів термомеханіки багатошарових середовищ. Такий комплексний підхід дозволяє врахувати синергетичний вплив транспортних навантажень, кліматичних факторів та фізико-механічних властивостей матеріалів дорожнього одягу на процеси деградації дорожніх покриттів.

Експериментальною базою дослідження виступили ділянки автомобільних доріг загального користування державного значення Київського вузла, що характеризуються високим відсотком важковагового транспорту (табл. 1) та зазнали інтенсивного руйнування після зимового періоду експлуатації. У роботі використано результати інструментальних обстежень дорожнього покриття, зокрема дані дефлектометрії (визначення прогинів конструкції під динамічним навантаженням), результати візуального моніторингу дефектів покриття та статистичні дані щодо інтенсивності руху транспортних потоків. Застосування цих методів дозволяє оцінити фактичний напружено-деформований стан конструкцій дорожнього одягу та визначити масштаби післязимової деструкції покриттів.

Таблиця 1 – Характеристика дослідних ділянок автомобільних доріг
Table 1 – Characteristics of experimental road sections

Назва та номер дороги	Технічна категорія	Тип покриття (верхній шар)	Фактична інтенсивність (авто/добу)
М-05 Київ – Одеса	I-a	Асфальтобетон дрібнозернистий (Тип Б)	> 22 000
М-06 Київ – Чоп	I-a	ЩМА-20	> 25 000
Р-01 Київ – Обухів	I-б	Асфальтобетон дрібнозернистий (Тип Б)	12 000 – 15 000
Т-10-27 Київська кільцева дорога	II	ЩМА-15	> 18 000

Вибір зазначених об'єктів дозволив охопити основні типи дорожніх конструкцій Київського транспортного вузла, що працюють у режимі надвисокої інтенсивності. Інструментальний моніторинг та заміри пружних прогинів проводилися у період березень-травень 2024-2026 рр. Зазначений часовий інтервал є критичним, оскільки характеризується максимальним розволоженням ґрунтів земляного полотна та зниженням модуля пружності конструктивних шарів. Це дозволило зафіксувати роботу

дорожнього одягу у найбільш несприятливий гідротермічний період та верифікувати математичну модель у граничних умовах експлуатації

Для опису процесів деградації дорожніх покриттів використано підхід, заснований на теорії накопичення втомних пошкоджень у матеріалах. Розрахунок довговічності дорожнього одягу здійснювався на основі гіпотези лінійного обчислення пошкоджень Пальмгрена–Майнера, яка дозволяє оцінити ступінь вичерпання ресурсу конструкції під дією повторюваних транспортних навантажень. Показник накопичення пошкоджень визначався на основі співвідношення:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}, \quad (1)$$

де n_i – фактична кількість циклів прикладення навантаження певного рівня;

N_i – гранична кількість циклів до руйнування при відповідному рівні напружень;

k – кількість рівнів навантаження.

Досягнення значення $D=1$ відповідає граничному стану конструкції та виникненню руйнування. Залишковий ресурс дорожнього покриття оцінювався за допомогою коефіцієнта ресурсу:

$$R_{\text{рез}} = 1 - D, \quad (2)$$

де R – відносний показник залишкового ресурсу конструкції дорожнього одягу.

Такий підхід дозволяє кількісно оцінити ступінь деградації дорожнього покриття після зимового періоду та визначити потенційний термін його подальшої експлуатації.

Окремим аспектом методології є дослідження явища «гідротермічного розклинювання», яке пояснює масову деградацію покриттів саме у весняний період. Авторами встановлено, що руйнування активізується через фізичний вплив вільної вологи, яка потрапляє в мікротріщини. При замерзанні води виникає внутрішній криогенний тиск, що в поєднанні з термічними градієнтами та механічним тиском коліс створює напружений стан, який перевищує межу міцності асфальтобетону на розтяг.

Для дослідження фізико-математичної природи руйнування дорожніх конструкцій застосовано методи термодинамічного аналізу процесів у багатошаровому середовищі дорожнього одягу. У межах цього підходу дорожнє покриття розглядається як шаруватий напівпростір, напружено-деформований стан якого формується під впливом транспортних навантажень та температурних змін. У математичну модель інтегровано рівняння теплопровідності для оцінки глибини промерзання конструкції та розрахунку зниження модуля пружності матеріалу період весняного відтавання (за оцінками авторів на 30-40%).

Математичне моделювання термомеханічних процесів виконувалося з використанням положень теорії термов'язкопружності та чисельних методів розв'язання задач механіки деформівного твердого тіла. Для аналізу розподілу напружень у шарах дорожнього одягу застосовувалися чисельні алгоритми, зокрема метод скінченних елементів, що дозволяє врахувати складну геометрію конструкції та неоднорідність температурних полів.

Температурний вплив на властивості асфальтобетону враховувався через функцію релаксації матеріалу:

$$R(t) = \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (3)$$

де E_i – модулі пружності елементів реологічної моделі;

τ_i – характерні часи релаксації;

n – кількість елементів моделі.

Застосування цієї залежності дозволяє врахувати зміну в'язкопружних характеристик асфальтобетонних матеріалів під впливом температури та тривалості навантаження.

Окрему увагу у дослідженні приділено аналізу впливу сучасних транспортних навантажень. Встановлено, що більшість дорожніх конструкцій України була спроектована за нормативами, які передбачали навантаження на вісь 6-10 т, тоді як сучасні вантажні транспортні засоби створюють осьові навантаження до 11,5-13 т. Такий дисонанс між розрахунковими параметрами та реальними умовами експлуатації призводить до експоненціального зростання швидкості накопичення пошкоджень, перетворюючи плановий знос на лавиноподібне руйнування.

Для оцінювання ступеня руйнування дорожнього покриття введено показник відносної площі деструкції:

$$S_{\text{дестр}} = \frac{S_{\text{пошк}}}{S} \quad (4)$$

де $S_{\text{пошк}}$ – площа пошкоджених ділянок дорожнього покриття;

S – загальна площа досліджуваної ділянки дороги.

Цей показник використовується як один із ключових параметрів для прийняття рішень щодо вибору технології відновлення дорожнього покриття.

Оптимізація стратегії відновлення дорожніх покриттів здійснювалася з використанням методів математичної оптимізації. Для цього було сформовано критерій економічної доцільності виконання ямкового ремонту, який базується на порівнянні витрат на локальне усунення дефектів та витрат на капітальне відновлення дорожнього покриття. Встановлено критичний поріг деструкції ($S_{\text{дестр}} = 30\%$), за яким ямковий ремонт стає економічно недоцільним через перевищення швидкості деградації над швидкістю відновлення. Порогове значення показника деструкції визначалося шляхом мінімізації сумарних витрат на експлуатацію та ремонт дорожньої конструкції.

Для оцінювання можливостей підвищення довговічності дорожніх покриттів також було проаналізовано вплив застосування синтетичних армувальних матеріалів та полімерних модифікаторів у складі асфальтобетону. Ефективність таких рішень оцінювалася за допомогою коефіцієнта підвищення довговічності:

$$K_d = \frac{N_m}{N_{\text{м}}} \quad (5)$$

де N_m – кількість циклів навантаження до руйнування модифікованого матеріалу;

$N_{\text{м}}$ – кількість циклів до руйнування традиційного асфальтобетону.

Застосування запропонованих математичних підходів дозволяє прогнозувати зміну технічного стану дорожніх покриттів після зимового періоду експлуатації та обґрунтовувати вибір оптимальних технологій їх відновлення. Розроблена методологія може бути використана для створення автоматизованих систем моніторингу стану дорожньої інфраструктури та формування науково обґрунтованих програм утримання автомобільних доріг.

Запропонований аналітичний підхід дозволяє кількісно визначити момент переходу дорожньої конструкції в непрацездатний стан, враховуючи специфіку вітчизняних асфальтобетонів та екстремальні температурні коливання весняного періоду.

Результати та обговорення. У ході проведення дослідження було встановлено, що динаміка деградації дорожніх покриттів в Україні має чітко виражений сезонний характер. Найбільш інтенсивне накопичення дефектів відбувається у післязимовий період, що підтверджує висунуту авторами гіпотезу про синергію гідротермічного розклинювання та зростаючих осьових навантажень.

На основі розробленого математичного алгоритму, що базується на законі Пальмгрена–Майнера (1), було проведено моделювання накопичення втомних пошкоджень у нежорсткому дорожньому одязі. Результати розрахунків (табл. 2) свідчать, що перехід від застарілих нормативів (6-8 т на вісь) до сучасних великогазових впливів без адекватного посилення конструкції призводить до експоненціального скорочення міжремонтних термінів.

Таблиця 2 – Розрахункові показники залишкового ресурсу конструкцій залежно від осьового навантаження

Table 2 – Calculated indicators of the residual life of structures depending on the axial load

Розрахункове навантаження на вісь, кН (т)	Допустима кількість циклів прикладення, тис. циклів	Розрахунковий термін служби, років	Коефіцієнт прискорення зносу
80 (8,1)	12,4	15,0	1,00
100 (10,2)	5,85	7,1	2,11
115 (11,7)	3,10	3,8	3,95
130 (13,2)	1,65	2,0	7,51

Отримані розрахункові дані (табл. 2) знаходять пряме підтвердження під час натурних обстежень дослідних ділянок. Зокрема, на магістралі М-05 Київ - Одеса інтенсивний рух великогазового транспорту в поєднанні з весняним перезволоженням основи призвів до утворення сітки втомних тріщин та вибоїн вже на 3-й рік експлуатації після проведення ремонтних робіт. Це корелює з розрахованим коефіцієнтом прискорення зносу (7,51), який доводить, що один проїзд сучасного вантажного автомобіля з осьовим навантаженням 13 т скорочує ресурс покриття такою ж мірою, як вісім проїздів еталонного транспортного засобу (80 кН)

Математично це пояснюється тим, що напруження в нижніх шарах асфальтобетону перевищують межу витривалості, розраховану за функцією релаксації (3). У такому стані матеріал втрачає здатність до релаксації напружень, що переводить процес накопичення мікротріщин у фазу лавиноподібного руйнування.

Статистична обробка результатів інструментальних обстежень представницької вибірки ділянок протяжністю 15 км дозволила встановити реальний технічний стан різних категорій доріг після зимового періоду 2024-2026 рр. (табл. 3).

Таблиця 3 – Статистична оцінка технічного стану ділянок мережі автомобільних доріг загального користування після зимового періоду

Table 3 – Statistical assessment of the technical condition of public road network sections after the winter period

Категорія дороги	Обстежена протяжність, км	Середній бал стану (1–5)	Середня площа деструкції $S_{дестр}$, %.
Міжнародні (М)	5	2,45	18,5
Регіональні (Р)	5	1,80	32,4
Територіальні (Т)	5	1,55	48,2

Важливим науковим результатом дослідження є верифікація теоретичної моделі емпіричними даними. Встановлено, що для територіальних доріг (Т), де зафіксовано середню площу деструкції 48,2%, показник залишкового ресурсу фактично наблизився до нуля. Це корелює з результатами моделювання напружено-деформованого стану, які вказують на повну втрату тримальної здатності конструкції через критичне зниження модуля пружності матеріалів у період весняного відтавання. Зниження тримальної здатності земляного полотна при перезволоженні призводить до того, що асфальтобетонні шари починають працювати на вигин з амплітудою, яка значно перевищує допустимі межі. Це зумовлює появу сітки тріщин, яка за умов осьового навантаження 11,5-13 т перетворюється на наскрізні вибоїни протягом лічених тижнів.

Побудована залежність «залишковий ресурс - площа пошкоджень» демонструє експоненціальне падіння тримальної здатності після досягнення критичної позначки $S_{\text{дестр}} \approx 30\%$. Порівняння наших даних із працями О. Оніщенка (2022) підтверджує, що кліматичний фактор в умовах України діє як деструктивний каталізатор. На ділянках зі складним поздовжнім профілем негативний ефект від великогазового транспорту посилюється ще на 15 - 20% через додаткові динамічні удари та гальмівні зусилля.

На відміну від загальних імовірнісних моделей R. Smith (2021), запропонований авторами підхід враховує реальні умови експлуатації та дефіцит фінансування. Ми обґрунтували, що при $S_{\text{дестр}} > 30\%$ традиційний ямковий ремонт стає економічно шкідливим, оскільки швидкість деградації перевищує технічні можливості локального відновлення. В умовах воєнного стану та обмеженого бюджету стратегія експлуатаційного утримання має базуватися на суворій пріоритезації об'єктів, оскільки хаотичне латання вибоїв не забезпечує стабілізації міжремонтних термінів стратегічної мережі.

Наші висновки щодо ефективності армування узгоджуються з результатами M. Arabani & M. Faramarzi (2022). Проте нами вперше доведено, що для українських доріг саме поєднання жорсткого армування із полімерними модифікаторами дозволяє «законсервувати» залишковий ресурс на рівні 15-20% навіть за умови критичних циклів «заморожування-відтавання». Це дає необхідний час для акумуляції інвестицій або реалізації цифрових стратегій моніторингу, що є критично важливим для відновлення транспортної мережі в умовах євроінтеграції.

Висновки. У результаті проведеного комплексного дослідження розроблено та теоретично обґрунтовано систему математичних підходів до оцінки технічного стану дорожніх конструкцій. Запропонована методологія дозволяє адаптувати стратегії утримання та відновлення дорожньої мережі України до екстремальних кліматичних впливів та сучасних логістичних реалій. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Математично обґрунтовано фізичну природу «весняної деградації» покриттів. Встановлено, що ключовим чинником руйнування є синергія транспортного навантаження та явища «гідротермічного розклинювання». Шляхом моделювання термомеханічних процесів у шаруватому напівпросторі доведено, що внаслідок криогенного тиску вологи в мікротріщинах та зміни реологічних властивостей матеріалів, фактичний модуль пружності асфальтобетону знижується на 30 - 40%. Це підтверджено замірами пружного прогину на дослідних ділянках доріг М-03 та М-05 у березні - травні 2024 - 2026 рр., що переводить напружено-деформований стан конструкції у фазу, де навіть нормативні навантаження викликають незворотні структурні руйнування.

2. Кількісно оцінено деструктивний ефект наднормативної ваги. На основі закону накопичення втомних пошкоджень Пальмгрена-Майнера встановлено, що для магістральних доріг визначальним чинником є зростання осьового навантаження до 115 - 130 кН. Експлуатація застарілих конструкцій під дією таких навантажень призводить до прискорення зносу у 4 - 7,5 рази. Це фактично скорочує реальний міжремонтний термін служби з проєктних 15 років до критичних 2-3 років, що корелює з фактичним станом покриття на трасі М-05 Київ - Одеса, де втомні руйнування зафіксовано на 3-й рік експлуатації.

3. Обґрунтовано математичний критерій вибору технології відновлення. Шляхом статистичного аналізу експериментальних ділянок виявлено критичний поріг деструкції на рівні $S_{дестр} > 30\%$.

Встановлено, що після подолання цієї межі процес руйнування набуває лавиноподібного характеру, при якому традиційний ямковий ремонт втрачає економічну доцільність. Запропонована математична залежність «залишковий ресурс - площа пошкоджень» дозволяє обґрунтувати перехід до методів суцільного пошарового відновлення або підсилення конструкції.

4. Доведено ефективність методів стабілізації ресурсу армуванням. Встановлено, що використання синтетичних армувальних матеріалів та полімерних модифікаторів, розроблених з урахуванням функцій релаксації асфальтобетону, дозволяє перерозподілити концентратори напружень. Це забезпечує зростання коефіцієнта підвищення довговічності та створює «запас міцності» проти температурного стресу, що є критично важливим в умовах обмеженого бюджетного фінансування для збереження стратегічних маршрутів, таких як М-06 Київ - Чоп.

5. Визначено необхідність зміни економічної парадигми відновлення. Аналіз вартості будівництва та масштаби руйнувань (потреба у понад 50 млрд грн на відновлення після екстремальної зими 2025-2026 рр) свідчать про неможливість подолання кризи лише коштами резервного фонду. Доведено, що математичне моделювання пріоритетності ремонтів на основі індексу стану та інтенсивності руху має стати базою для залучення нових фінансових інструментів. Впровадження запропонованих підходів дозволяє оптимізувати розподіл обмежених ресурсів Дорожнього фонду, підвищуючи ефективність використання бюджетних коштів на 15-20% за рахунок відмови від економічно недоцільних ямкових ремонтів на користь системного відновлення стратегічних маршрутів.

Перелік посилань

1. Arabani, M., & Faramarzi, M. (2022). Mathematical modeling of the fatigue life of glass fiber-reinforced asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(4), 04022031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004143](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004143)
2. Безуглий А. О. Економічне обґрунтування стратегій утримання автомобільних доріг. *Автошляховик України*. 2021. № 2. С. 10–15.
3. Cannone Falchetto, A., Moon, K. H., & Wang, D. (2021). Comparison of low temperature fracture properties of asphalt mixtures using different experimental methods. *Construction and Building Materials*, 272, 121920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121920>
4. Chen, X., & Liu, Y. (2023). Hydrothermal stability of subgrade soils under freeze-thaw cycles. *Journal of Cold Regions Engineering*, 37(2), 45-58. <https://doi.org/10.1061/JCRGEI.CRENG-632>
5. El-Badawy, S., & Abd El-Hakim, R. (2022). Predicting the residual life of flexible pavements using falling weight deflectometer data. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 412-425.
6. Гамеляк І. П. Методи підвищення довговічності дорожніх покриттів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2022. № 111. С. 45–52.
7. Гамеляк І. П., Дмитрієв М. М. Моделювання впливу кліматичних факторів на деградацію транспортної інфраструктури. *Вісник Національного транспортного університету*. 2023. № 2 (53). С. 88–96.
8. Huang, J., & Sun, Y. (2021). Optimization of pavement maintenance schedules using genetic algorithms. *Automation in Construction*, 124, 103565.
9. Johnson, K. (2024). Impact of heavy axle loads on aging infrastructure: A statistical approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 30(1), 04023045.
10. Левківська Л. В., Елаллак Д. М. Підвищення експлуатаційних показників асфальтобетону шляхом армування синтетичними волокнами. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. № 113. С. 61–68. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2023-113.1-061-068>
11. Левківська Л. В., Гринчак І. І., Елаллак Д. М. Аналіз існуючих методів оцінки якості зчеплення між шарами дорожнього одягу. *Вісник Національного транспортного університету*. 2022. № 1 (51). С. 267–274. –274. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-267-274>

12. Liu, Q., & Wang, H. (2022). Nonlinear fatigue damage accumulation in asphalt pavements under climate change. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(3), 890-905. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1773463>
13. Мозговий В. В., Кушнір О. П., Левківська Л. В., Куцман О. М. Виявлення особливостей напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на підйомах і спусках автомобільних доріг. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2024. № 5 (1). С. 99–109. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.307829>
14. Mueller, J. (2022). European standards for road infrastructure resilience under extreme weather. *Transport Research Arena*, 201-215.
15. Онищенко О. М. Інноваційні підходи до проектування асфальтобетонних покриттів при високих навантаженнях. *Дорожні матеріали та конструкції*. 2022. № 23 (11). С. 2450–2468.
16. Онищенко О. М., Федоренко В. В. Математичне моделювання взаємодії важковагових транспортних засобів та конструкції дороги. *Журнал транспортної інженерії*. 2023. № 149 (5).
17. Pirayonesi, S. M., & El-Diraby, T. E. (2020). Data analytics in asset management: Cost-effective prediction of the pavement condition index. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(1), 04019036.
18. Савенко В. Я., Кулик М. В. Стратегічне планування відновлення дорожньої мережі в кризових умовах. *Транспортні системи та технології*. 2021. № 38. С. 12–21.
19. Савенко В. Я., Ткачук О. П. Методика оцінки експлуатаційної надійності автомобільних доріг за умов підвищених осьових навантажень. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2022. № 112. С. 15–24.
20. Smith, R. (2021). Probability methods in pavement life prediction for heavy-duty highways. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(11), 1340-1355.
21. Ткачук О. П. Оптимізація витрат на експлуатаційне утримання доріг в умовах воєнного стану. *Автомобільні дороги України*. 2024. № 1. С. 18–24.
22. Vavrychuk, V., & Solodkyi, S. (2021). Residual Life Prediction of Asphalt Pavements Based on Deflection Measurements. *Applied Sciences*, 11(15), 6821.
23. Wang, D., & Falchetto, A. C. (2022). Microstructural analysis of asphalt mixtures using X-ray computed tomography. *Materials and Structures*, 55, 112.
24. Yang, X., & You, Z. (2021). Research on recycled asphalt mixtures: A mathematical perspective. *Sustainability*, 13(5), 2910.
25. Zhang, Y., & Mohseni, A. (2021). Evaluation of pavement service life based on reliability analysis. *Structures and Infrastructure Engineering*, 17(5), 654-668.

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

Mozgovyi Volodymyr V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Road Construction Materials and Chemistry, National Transport University, room 109, 42 Boychuk St., Kyiv, Ukraine, 01103, e-mail: mozgoviy@gmail.com, +380505062564, <https://orcid.org/0000-0002-1032-8048>.

Levkivska Liudmyla V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, National Transport University, 01103, Ukraine, Kyiv, st. M. Boychuka 42, room 514, e-mail: l.v.g.ntu@gmail.com, +380505114407, <https://orcid.org/0000-0002-5589-5257>.

Shevchuk Liudmyla V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, National Transport University, 01103, Ukraine, Kyiv, st. M. Boychuka 42, room 511, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, +380667153633, <https://orcid.org/0000-0002-5748-9527>.

Anna Feschenko, 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: fanna17@ukr.net, tel. +380677441754, <https://orcid.org/0000-0002-8212-52>

Summary. The article scientifically substantiates mathematical methods for assessing the residual life of flexible pavements in Ukraine following extreme winter loads. The authors analyze a complex of destructive

factors: adverse climate, chronic underfunding, and violations of technological standards. Particular attention is paid to the budget deficit during martial law, which precludes scheduled repairs and leads to a landslide degradation of strategic transport network objects amid changing logistical routes.

Within the scope of the study, the mechanisms of thermal influence on road materials are expanded through the prism of the theory of thermomechanics of multilayer media and processes of hydrothermal wedging of pavements. Based on the mathematical relationship between the stress-strain state of the structure and the durability index according to the Palmgren-Miner law, a critical discrepancy was identified between outdated design standards (6-10 t per axle) and modern loading standards (11.5-13 t). It is proved that such a disproportion provokes an accelerated depletion of the pavement's service life by 4-7.5 times, effectively neutralizing the safety margin of the structures. Through the application of numerical modeling methods and the processing of instrumental survey data, the current state of the road network is defined as marginal (1.55-2.45 points), requiring immediate scientific intervention.

The paper critically evaluates the practice of pothole repair as a temporary measure. The authors emphasize that the effectiveness of local restoration is low without considering the relaxation function of asphalt concrete and the optimization of the rheological properties of mixtures. The economic inexpediency of pothole patching when the threshold of the relative area of destruction exceeds 30% is theoretically substantiated. Overcoming this limit indicates a loss of load-bearing capacity and the necessity for capital restoration.

The article proposes a transition to digital monitoring tools through the development of applied engineering methodologies. Further research will focus on analyzing the phenomenon of "hydrothermal wedging" and developing predictive tables for residual life based on the refined Palmgren-Miner law for heavy-duty vehicles. A specific area of focus is improving energy efficiency by using additives for low-temperature asphalt paving. Implementing these steps will transform mathematical modeling into a practical monitoring tool and ensure the integration of Ukraine's infrastructure into a unified European digital network.

Keywords: road pavement, residual life, severe winter, pothole repair, destruction, asphalt concrete, serviceability.

References

1. Arabani, M., & Faramarzi, M. (2022). Mathematical modeling of the fatigue life of glass fiber-reinforced asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(4), 04022031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004143](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004143)
2. Bezuglyi, A. O. (2021). Ekonomichne obgruntuvannya stratehii utrymannia avtomobilnykh dorih [Economic substantiation of road maintenance strategies]. *Avtoshliakhovyk Ukrayiny*, (2), 10–15. [in Ukrainian]
3. Cannone Falchetto, A., Moon, K. H., & Wang, D. (2021). Comparison of low temperature fracture properties of asphalt mixtures using different experimental methods. *Construction and Building Materials*, 272, 121920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121920>
4. Chen, X., & Liu, Y. (2023). Hydrothermal stability of subgrade soils under freeze-thaw cycles. *Journal of Cold Regions Engineering*, 37(2), 45-58. <https://doi.org/10.1061/JCRGEI.CRENG-632>
5. El-Badawy, S., & Abd El-Hakim, R. (2022). Predicting the residual life of flexible pavements using falling weight deflectometer data. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 412-425.
6. Hameliak, I. P. (2022). Metody pidvyshchennia dovhovichnosti dorozhnikh pokryttiv [Methods for increasing the durability of road surfaces]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, (111), 45–52.
7. Hameliak, I. P., & Dmytriiev, M. M. (2023). Modeliuvannya vplyvu klimatychnykh faktoriv na dehradatsiiu transportnoi infrastruktury [Modeling the impact of climatic factors on the degradation of transport infrastructure]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 2(53), 88–96. [in Ukrainian]
8. Huang, J., & Sun, Y. (2021). Optimization of pavement maintenance schedules using genetic algorithms. *Automation in Construction*, 124, 103565.
9. Johnson, K. (2024). Impact of heavy axle loads on aging infrastructure: A statistical approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 30(1), 04023045.

10. Levkivska, L. V., & Elallak, D. M. (2023). Pidvyshchennia ekspluatatsiinykh pokaznykiv asfaltobetonu shliakhom armuvannia syntetychnymy voloknamy [Improving the performance of asphalt concrete by reinforcing with synthetic fibers]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, (113), 61–68. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2023-113.1-061-068> [in Ukrainian]
11. Levkivska, L. V., Hrynychak, I. I., & Elallak, D. M. (2022). Analiz isnuvachykh metodiv otsinky yakosti zcheplennia mizh sharamy dorozhnogo odiahu [Analysis of existing methods for assessing the quality of adhesion between road layers]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 1(51), 267–274. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-267-274> [in Ukrainian]
12. Liu, Q., & Wang, H. (2022). Nonlinear fatigue damage accumulation in asphalt pavements under climate change. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(3), 890–905. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1773463>
13. Mozhovyi, V. V., Kushnir, O. P., Levkivska, L. V., & Kutsman, O. M. (2024). Vyiavlennia osoblyvosti napruzhenno-deformovanoho stanu nezhorstkoho dorozhnogo odiahu na pidimakh i spuskakh avtomobilnykh dorih [Identifying features of the stressed-strained state of a non-rigid roadbed along ascents and descents on highways]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1), 99–109. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.307829> [in Ukrainian]
14. Mueller, J. (2022). European standards for road infrastructure resilience under extreme weather. *Transport Research Arena*, 201–215.
15. Onyshchenko, O. M. (2022). Innovatsiini pidkhody do proiektuvannia asfaltobetonnykh pokryttiv pry vysokomykh navantazhenniakh [Innovative approaches to the design of asphalt pavements under high loads]. *Dorozhni materialy ta konstruktsii*, 23(11), 2450–2468. [in Ukrainian]
16. Onyshchenko, O. M., & Fedorenko, V. V. (2023). Matematychni modeliuvannia vzaiemodii vazhkovahovykh transportnykh zasobiv ta konstruktsii dorohy [Mathematical modeling of the interaction between heavy vehicles and road structure]. *Journal of Transport Engineering*, 149(5). [in Ukrainian]
17. Pirayonesi, S. M., & El-Diraby, T. E. (2020). Data analytics in asset management: Cost-effective prediction of the pavement condition index. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(1), 04019036.
18. Savenko, V. Ya., & Kulyk, M. V. (2021). Stratehichne planuvannia vidnovlennia dorozhnoi merezhi v kryzovykh umovakh [Strategic planning of road network restoration in crisis conditions]. *Transportni systemy ta tekhnologii*, (38), 12–21. [in Ukrainian]
19. Savenko, V. Ya., & Tkachuk, O. P. (2022). Metodyka otsinky ekspluatatsiinoi nadiinosti avtomobilnykh dorih za umov pidvyshchenykh osovykh navantazhen [Methodology for assessing the operational reliability of highways under increased axle loads]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, (112), 15–24. [in Ukrainian]
20. Smith, R. (2021). Probability methods in pavement life prediction for heavy-duty highways. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(11), 1340–1355.
21. Tkachuk, O. P. (2024). Optyimizatsiia vytrat na ekspluatatsiine utrymannia dorih v umovakh voiennoho stanu [Optimization of costs for operational maintenance of roads under martial law]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, (1), 18–24. [in Ukrainian]
22. Vavrychuk, V., & Solodkyi, S. (2021). Residual Life Prediction of Asphalt Pavements Based on Deflection Measurements. *Applied Sciences*, 11(15), 6821.
23. Wang, D., & Falchetto, A. C. (2022). Microstructural analysis of asphalt mixtures using X-ray computed tomography. *Materials and Structures*, 55, 112.
24. Yang, X., & You, Z. (2021). Research on recycled asphalt mixtures: A mathematical perspective. *Sustainability*, 13(5), 2910.
25. Zhang, Y., & Mohseni, A. (2021). Evaluation of pavement service life based on reliability analysis. *Structures and Infrastructure Engineering*, 17(5), 654–668.

Дата надходження до редакції 12.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 03.03.2026.

УДК 691.65:678.6
UDC 691.65:678.6

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-273-284

**ПОЛІМЕРНА ДОБАВКА «AVE18» VELETON™ ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ БІТУМІВ:
НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ У ПОРІВНЯННІ З SBS****VELETON™ ‘AVE18’ POLYMER ADDITIVE FOR BITUMEN MODIFICATION:
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JUSTIFICATION OF EFFECTIVENESS COMPARED WITH
SBS**

Мороз Вадим Сергійович, аспірант кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010, e-mail: v.moroz.lion@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-5554-6086>

Анотація. У статті систематизовано результати лабораторних випробувань полімерної добавки «AVE18» VELETON™ для модифікації бітумів і асфальтобетонних сумішей. На підставі звітних даних випробувань (Національний транспортний університет, м. Київ; АТ «КазДорНДІ»; ДП «Центр якості», м. Астана) узагальнено ключові експлуатаційні показники модифікованих асфальтобетонів: підвищення міцності (R_0 , R_{20} до 6 МПа; R_{50} до 2,4 МПа) та значне покращення колієстійкості – глибина колії ~1,2–1,4 мм за 20 000 проходів (метод Гамбурзького колеса) при нормативі ≤ 3 мм. Показано, що добавка AVE18 є ефективною альтернативою латексам та SBS-полімерним системам: потребує нижчої температури модифікації бітуму (175–180 °C) і меншого часу для отримання стабільного модифікованого в'язучого (2–4 год), демонструє короткий час термостабілізації (~30 хв) та знижену схильність до розшарування. Окреслено технологічні переваги використання AVE18 на асфальтних заводах (відсутність потреби в колоїдному млині, типова доза 2 %), розглянуто механізм дії (клеюві термоеластоласти, що покращують в'язкоеластичні властивості бітуму), відповідність матеріалу вимогам стандартів ДСТУ 8959:2019, СТ РК 1223:2019 і СТ РК 2373:2019. Надано практичні рекомендації щодо дозування та контролю якості модифікованого бітуму. Розраховано економічний ефект від впровадження технології AVE18: за рахунок зниження витрат полімеру, енергоносіїв та підвищення продуктивності модифікація бітуму стає більш рентабельною. Зроблено висновки про доцільність широкого впровадження AVE18 для підвищення довговічності дорожніх покриттів, окреслено перспективи подальших досліджень і застосування технології.

Ключові слова: AVE18 VELETON™, модифікований бітум, полімерна добавка сухого вводу, SBS, термоеластопласт, колієстійкість, показники $R_0/R_{20}/R_{50}$, випробування «Гамбурзьке колесо», полімер-асфальтобетон.

Вступ. Модифікація бітумів – перевірений десятиліттями напрям удосконалення властивостей дорожніх покриттів. Перші рішення ще у середині XX століття ґрунтувалися на додаванні до бітуму природних асфальтів та маслянистих флюсів; згодом з'явилися каучуки та латекси; а в 1960–1980-х роках масового поширення набули полімерні модифікатори (SBS, EVA, ПЕ тощо). Метою всіх цих технологій було розширити робочий температурно-деформаційний діапазон бітумного в'язучого: підвищити опір утворенню колії за високих літніх температур, зберігши пружність і тріщиностійкість

за низьких температур, а також покращити адгезію до мінерального матеріалу та водостійкість покриття. Класичні SBS-композиції в 1980-х рр. забезпечили різкий крок уперед, поєднавши теплостійкість і еластичність в одному матеріалі. Паралельно розвивалися так звані пластомерні модифікатори (на основі етилен-вінілацетату, поліетилену) та реактивні або воскові добавки. На практиці вибір модифікатора завжди був компромісом між досягнутими властивостями в'язучого, складністю технології та економічними витратами на асфальтному заводі. Сучасні тенденції вимагають підвищення ефективності модифікації: скорочення енерговитрат і часу на приготування модифікованого бітуму, забезпечення стабільності при зберіганні та відтворюваності результатів на різних бітумних базах, а також прогнозованої роботи модифікованого в'язучого у складі асфальтобетону.

Попри суттєві переваги в експлуатаційних властивостях покриття, технологія модифікації бітуму полімерами типу SBS має і недоліки. Зокрема, стандартні SBS-модифікатори потребують підвищених температур ($\approx 190\text{--}195\text{ }^{\circ}\text{C}$) і тривалого диспергування бітуму (8–12 год) для досягнення однорідної структури, часто із застосуванням колоїдного млина. Тривале нагрівання прискорює старіння в'язучого, а зберігання модифікованого бітуму пов'язане з ризиком розшарування (стратифікації) полімерної добавки при недостатній сумісності з базовим бітумом. Крім того, висока температура і значна тривалість процесу збільшують витрати палива та електроенергії, що підвищує собівартість модифікації. Ці чинники створюють технологічні бар'єри для багатьох асфальтобетонних заводів щодо впровадження полімер-містких технологій. Таким чином, актуальним є пошук альтернативних полімерних добавок, які б забезпечували покращення властивостей бітуму не поступаючись SBS за ефектом, але були б простішими у використанні (менші вимоги до температури, часу, обладнання) та економічно вигіднішими.

Одним із ключових показників якості модифікованого асфальтобетону є стійкість до утворення колії. Колієутворення – це основний вид деформації на дорогах з інтенсивним рухом у жаркий період. Під навантаженням колеса при високій температурі мастика (бітум з наповнювачем) в шарі покриття поводить себе як дуже в'язка гума: мінеральний скелет дещо перебудовується, а в'язуче повільно перетекає, що призводить до просідання колеса і утворення поздовжніх заглибин – колій. Лабораторний тест на колієстійкість (динамічне навантаження колеса, т.зв. «Гамбурзьке колесо») моделює інтенсивний рух за сталих умов: зразок асфальтобетону піддають циклічним навантаженням колеса (10–20 тисяч проходів і більше) при підвищеній температурі і за наявності води. Хоча такий тест не відтворює повністю реальну дорогу, він дає калібровану шкалу для порівняння сумішей. Зокрема, якщо після 20 000 циклів навантаження глибина колії становить $\sim 1,0\text{--}1,5\text{ мм}$, то в реальних умовах експлуатації така суміш буде деформуватися значно повільніше, ніж суміш із колією 3,0 мм (гранично допустима норма). Різниця у показнику колійності прямо конвертується в довший міжремонтний термін служби покриття: наприклад, при зменшенні колії з 3 мм до $\sim 1,5\text{ мм}$ запас досягнення граничного стану зростає приблизно вдвічі. Практика показує, що в міських смугах громадського транспорту така різниця може дати додатково 1–2 сезони до появи ремонтпридатної колії $\sim 5\text{--}7\text{ мм}$. На важконавантажених ділянках (перехрестя, підйоми) менша початкова колія означає повільніший розвиток зсувних тріщин і вибоїн, а на злітно-посадкових смугах та промислових майданчиках навіть 1–2 мм деформації мають значення для безпеки руху. Отже, досягнення мінімальної глибини колії $\sim 1\text{ мм}$ у лабораторному випробуванні сьогодні фактично розглядається як «золотий стандарт» для полімер-модифікованих асфальтобетонів.

Постановка проблеми. Основна проблема, на яку спрямовано дане дослідження, полягає в необхідності підвищити довговічність і стійкість дорожніх покриттів до утворення колії без значного ускладнення технології виробництва асфальтобетону. Традиційні модифікатори бітуму (насамперед SBS) забезпечують покращені високотемпературні властивості, але водночас вимагають високих технологічних температур, тривалого перемішування та спеціалізованого обладнання. Це призводить до збільшення витрат палива, часу і може спричиняти деградацію бітуму під час приготування, а також утруднює застосування модифікації на багатьох асфальтних заводах. Постає питання: як знизити температуру і тривалість приготування полімер-бітумного в'язучого та спростити технологію, не

жертвуючи при цьому якістю – тобто міцністю, коліє- та тріщиностійкістю, адгезією до кам'яних матеріалів та іншими експлуатаційними показниками покриття. На часі є розробка полімерної добавки «сухого» типу, яку можна вводити у бітум без дорогої модернізації обладнання, з меншими енерговитратами, і яка б забезпечила отримання асфальтобетону із підвищеною стійкістю до утворення колії. Саме вирішення цієї науково-технічної задачі розглядається в даній роботі.



Рисунок 1 – Колієутворення, деформації на дорогах з інтенсивним рухом у жаркий період
Figure 1 – Rutting—pavement deformations on heavily trafficked roads in hot weather.

Мета дослідження. Метою даної роботи є експериментальна оцінка та науково-технічне обґрунтування ефективності полімерної добавки AVE18 VELETON™ як альтернативи SBS для модифікації дорожніх бітумів. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

Проаналізувати сучасний стан і проблеми застосування полімерних модифікаторів бітуму та обґрунтувати необхідність альтернативних рішень.

Описати склад і механізм дії полімерної добавки AVE18, її технологічні особливості при введенні в бітум.

Дослідити основні фізико-механічні показники асфальтобетону на модифікованому AVE18 бітумі (міцність, колієстійкість тощо) в лабораторних умовах, порівняти їх із результатами для типових SBS-модифікованих систем.

Оцінити технологічні та економічні переваги використання AVE18 (зниження температури, енерговитрат, спрощення технології) у порівнянні з традиційною SBS-модифікацією бітуму.

Сформулювати рекомендації щодо впровадження добавки AVE18 у виробництво асфальтобетону та окреслити перспективи її застосування.

Вихідні матеріали. Для дослідження використовували такі матеріали:

Бітум: дорожній нафтовий бітум (марка за ДСТУ або EN), з відомими основними характеристиками – глибиною проникнення голки (пенетрацією), температурою розм'якшення (кільце й куля) та температурою крихкості (Фраасса). Вибір бітуму здійснювався у типових для верхніх шарів покриття границях пенетрації 60–90 × 0,1 мм при 25 °С, щоб модифіковане в'язуче відповідало вимогам до полімер-бітумних в'язучих (ПБВ).

Полімерна добавка: «AVE18» (TM VELETON™) – гранульована композиція на основі клейових термоеластопластів. Ця добавка постачається у твердому вигляді (гранули), стабільному при зберіганні, вводиться безпосередньо у бітум без попереднього розпускання чи емульгування. За хімічною природою містить термопластичні еластomers, які забезпечують еластичність і адгезійні властивості, а також допоміжні компоненти для покращення сумісності з бітумом.

Мінеральні матеріали: стандартні матеріали для асфальтобетонної суміші: щебінь фракцій 5–10 мм та 10–20 мм, природний пісок 0–5 мм, мінеральний порошок (наповнювач). У разі приготування щебенево-мастикового асфальтобетону (ЩМА) додатково використовувалися стабілізуючі целюлозні волокна (для запобігання стікання мастики).

Технологія модифікації бітуму AVE18. Модифікацію бітуму полімерною добавкою AVE18 здійснювали в умовах, наближених до реальних виробничих процесів на АБЗ. Бітум нагрівали до

температури 175–180 °С (такий температурний режим досяжний штатними нагрівачами бітумосховищ, на відміну від 190+ °С, необхідних для SBS). Після досягнення цільової температури гранульовану добавку AVE18 завантажували у бітум через сухий дозатор або вручну невеликими порціями. Перемішування здійснювали інтенсивно, використовуючи стандартне змішувальне обладнання з достатнім зсувним зусиллям (гвинтовий мішалка, лопатевий змішувач тощо). Колоїдний млин не застосовувався – на відміну від типових технологій зі SBS, для AVE18 достатньо хорошої турбулентної циркуляції бітуму. Час модифікації до досягнення однорідного стабільного в'язучого становив близько 2–4 годин (залежно від об'єму партії та ефективності перемішування). Після введення добавки і первинного диспергування проводили додаткову **термостабілізацію**: витримку модифікованого бітуму при робочій температурі (~175 °С) протягом ~30 хв при постійному повільному перемішуванні. Ця операція сприяє повному набухання полімеру в мальтевовій частині бітуму та вирівнюванню реологічних характеристик отриманого ПБВ перед подачею в змішувач асфальтобетону.



Рисунок 2 – Устаткування для модифікації бітуму
Figure 2 – Equipment for bitumen modification

Дозування добавки AVE18 становило базово 2 % від маси бітуму (таке співвідношення рекомендується виробником для більшості застосувань). У разі використання надто «м'яких» бітумів (з високою пенетрацією) або для особливо важких умов експлуатації покриття дозу можна було збільшити до 2,5–3,0 % – оптимальне значення визначали за результатами лабораторних випробувань суміші.

Методи випробувань. Для оцінки властивостей отриманого модифікованого в'язучого та асфальтобетону використовували такі методики:

Міцність при різних температурах: визначали показники міцності асфальтобетону при стиску безпосередньо після виготовлення (R_0), після 20 год витримки при 50 °С (R_{20}) та після 1 год при 50 °С (R_{50}). Випробування проводили за національними стандартними методиками (аналогічно ДСТУ В В.2.7-135:2007), які дають значення умовного модуля пружності матеріалу в МПа. Ці показники характеризують здатність матеріалу зберігати пружність і несучу здатність після дії підвищеної температури протягом певного часу.



Рисунок 3 – Випробування міцності при стиску
Figure 3 – Compressive strength testing

Колієстійкість: випробування на динамічне навантаження колеса («Гамбурзьке колесо») за стандартною методикою (згідно з DSTU B EN 12697-22). Зразки асфальтобетону (призма або таблетка) піддавали 10 000 циклам проходження навантажувального колеса при температурі +50...+60 °С. Вимірювали глибину колії (максимальну деформацію поверхні зразка) у міліметрах. Норма для полімер-модифікованих асфальтобетонів згідно з ДСТУ 8959:2019 – не більше 4 мм після 10 тис. проходів.



Рисунок 4 – Результат випробувань на колієстійкість
Figure 4 – Result of the rutting resistance test

Додаткові випробування: за наявності обладнання виконували також оцінку водостійкості асфальтобетону (коефіцієнт залишкової міцності ITSR після насичення водою і вакуумування, ДСТУ В В.2.7-121:2011), визначення умовного модуля пружності (за методом ущільнення резонансною колонкою або триточкового вигину, ДСТУ В EN 12697-26) та випробування на тріщиностійкість при згині і циклічному навантаженні (втомна міцність за ДСТУ В EN 12697-24). Ці показники використовували переважно для наукового аналізу і не є основними у стандартах на даний матеріал, тому їх результати наведено в обговоренні за наявності.

Результати. Механічні характеристики асфальтобетону з AVE18. Лабораторні випробування міцності показали, що використання 2 % полімерної добавки AVE18 для виготовлення ЩМА-20 дозволяє суттєво підвищити температурну стійкість асфальтобетону. Показники міцності при стиску

R_0 та R_{20} досягали 8,9 та 3,56 МПа залежно від складу суміші та базового бітуму, що значно вище мінімально необхідних $\sim 2,8$ МПа для дорожніх покриттів верхніх шарів. Показник R_{50} (міцність після 1 годин при 50°C) становив до 1,35 МПа. Це означає, що навіть після тривалої теплової дії модифікований матеріал зберігає міцність на рівні $\geq 1,3$ МПа, відповідаючи вимогам стандартів ДСТУ 8959:2019 (Україна) та СТ РК 2373:2019 (Казахстан) для полімер-асфальтобетонів дорожнього і аеродромного призначення. Іншими словами, AVE18 забезпечує необхідну структурну міцність асфальтобетону навіть за підвищених температур експлуатації.

Колієстійкість. Ключовим результатом дослідження є різке зменшення схильності асфальтобетону до утворення колії при використанні добавки AVE18. У лабораторних серіях випробувань на установці «Гамбурзьке колесо» середня глибина колії становила всього $\sim 0,96$ мм після 10 000 проходів колеса (при температурі 50°C і постійному зволоженні зразка). Для порівняння, контрольні суміші на немодифікованому бітумі за таких же умов мали колію $\sim 4\text{--}6$ мм, а навіть суміші на типовому SBS-модифікованому бітумі – близько 3 мм (гранично допустима норма). Отже, AVE18 дозволяє отримати більш ніж дворазовий запас за колієстійкістю відносно мінімальних вимог: **$\sim 0,96$ мм проти ≤ 3 мм нормативу**. Досвід практичного застосування також підтверджує ці висновки. За наданими партнерами даними, підрядні організації в Україні, що впроваджували дану добавку, отримували глибину колії $\sim 1,3\text{--}1,4$ мм у контрольних випробуваннях суміші (методика Гамбурзького колеса). В Казахстані, за результатами незалежних лабораторних досліджень, показник колійності становив $\leq 1,0$ мм за аналогічної методики випробувань. Таким чином, як лабораторні, так і дослідно-промислові партії асфальтобетону з AVE18 демонструють надзвичайно високий опір пластичним деформаціям. Практичне значення такого результату полягає у збільшенні довговічності покриття: навіть за інтенсивного руху й високих температур утворення колії буде відбуватися значно повільніше, що відтермінує необхідність ремонтів.

Технологічні особливості та переваги. Під час модифікації бітуму AVE18 було відмічено кілька важливих технологічних переваг порівняно з традиційними SBS-системами:

Нижча температура модифікації: $175\text{--}180^\circ\text{C}$ замість $\sim 190\text{--}195^\circ\text{C}$ для SBS. Більш низька температура означає менший термоокиснювальний вплив на бітум під час приготування – отже, в'яжуче менше старіє, зберігаючи еластичність на холоді.

Швидше досягнення готовності: $2\text{--}4$ год необхідно для повної диспергації AVE18 у бітумі, тоді як SBS зазвичай вимагає $6\text{--}10$ год безперервного перемішування. Скорочення часу циклу підвищує продуктивність виробництва та зменшує енерговитрати на підтримання температури.

Стабільність при зберіганні: модифікований AVE18 бітум після короткої термостабілізації (~ 30 хв) готовий до використання і може зберігатися без значної стратифікації полімеру. Випробування показали середню схильність до розшарування – нижчу, ніж у багатьох SBS-модифікованих бітумів за тих самих умов. Це полегшує логістику: модифіковане в'яжуче можна транспортувати чи зберігати певний час, не боячись втрати однорідності.

Відсутність потреби в колоїдному млині: достатньо стандартного змішувача. Гранули AVE18 добре диспергуються при інтенсивному перемішуванні, тому дорожні організації можуть впровадити технологію без капітальних вкладень у спецобладнання. Це знижує поріг входження для невеликих АБЗ.

Низька робоча доза: базова рекомендація – 2% маси бітуму, тоді як типові SBS-в'яжучі містять $\sim 3\%$ полімера. Менша кількість дорогого полімеру зменшує собівартість в'яжучого. При цьому досягнута міцність ($R_{50} \sim 1,3\text{--}1,4$ МПа) і колієстійкість ($\sim 0,96$ мм) є на рівні або кращими за аналогічні показники для SBS-модифікаторів ($R_{50} \sim 1,2$ МПа; колія $\sim 3\text{--}3,5$ мм за 10 тис. проходів).

Перелічені переваги означають, що AVE18 не тільки забезпечує високі експлуатаційні властивості суміші, а й полегшує виробничий процес. Зниження температури і тривалості приготування безпосередньо економить пальне і робочий час, а відсутність млина та менше дозування полегшує організацію виробництва.

Випробувальна лабораторія
 АТ «Казахстанський інститут дорожніх досліджень», Астана
 010000, Астана, проспект Турапа, 75
 Сертифікат акредитації № KZ. T.02.0603 від "08" квітня 2020 року

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАННЯ № 23

від «27» квітня 2023 року

Сторінка 1

Клієнт (ім'я та адреса): ТОВ «Lion Recycling Ukraine»
 Зразкова назва: Кам'яний мастиковий полімерний асфальтобетон з бітумним модифікатором «AVE-18» – 2,0%
 Акт відбору: Відбору, виконаний клієнтом
 Зразок реєстраційного номера: 23
 Дата отримання зразків для тестування: 10.04.2023
 Виробник (країна, компанія): Республіка Казахстан; суміш, виготовлена в лабораторії АТ «КаздорНИІ»
 Кількість зразка: 25 кг
 Регуляторні документи для продукту: ST RK 2373-2019; ST RK EN 12697-22-2012
 Дати тестування: початок 10.04.2023; завершення 14.04.2023
 Тип тестування: Проектування суміші (селекція) кам'яно-мастичного полімерного асфальтобетону з використанням бітумного модифікатора «AVE-18»
 Умови тестування: Температура: 22 °C; Вологість: 62%
 Температура підготовки зразка: 160–165 °C

Результати тестів

№.	Індикатор	Стандарт / метод тестування	Вимоги до методу тестування	Фактичний результат
1	Водонасичення, % за об'ємом	ST RK 1218	1.5–4.0	2.9
2	Міцність на стиск при 20°C, МПа	ST RK 1218	не менше 2,8	3.56
3	Міцність на стиск при 50°C, МПа	ST RK 1218	не менше 1.0	1.35
4	Міцність на стиск при 0°C, МПа	ST RK 1218	не більше 13,0	8.95
5	Опір зсуву: коефіцієнт внутрішнього тертя — когезія при 50°C, МПа	ST RK 1218	не менше 0,94 не менше 0,25	0.940.28
6	Стійкість до тріщин (непряма міцність на розрив / розщеплення) при 0°C, МПа	ST RK 1218	не менше 3.0 не більше 6.5	4.2
7	Глибина колії, мм	ST RK EN 12697-33-2012	не більше 3.0	0.96
8	Залишкова пористість в асфальтобетоні, %	ST RK 1218	понад 2,0 до 4,5	2.8
9	Стійкість до сегрегації (індикатор зливу в'язучої речовини), %	ST RK 2373	не більше 0,25	0.17

Рисунок 5 – Протокол з результатами випробувань

Figure 5 – Test report with results

Обговорення. Аналіз ефективності AVE18 vs. SBS. Отримані результати свідчать, що полімерна добавка AVE18 дійсно може слугувати повноцінною альтернативою класичному SBS для модифікації бітумів. За рахунок введення спеціальних термоеластопластів досягається аналогічний ефект підвищення пружності бітуму: показники міцності при стиску (R_0 , R_{20} , R_{50}) у досліджених сумішах з AVE18 знаходяться не нижче, а подекуди й вище, ніж у сумішах на SBS. Особливо показовим є критерій колієстійкості: глибина колії ~1,0мм, зафіксована для асфальтобетону з AVE18, приблизно вдвічі менша, ніж типові ~3 мм для SBS-модифікованого матеріалу. Це означає, що в реальних умовах покриття з такою добавкою матиме більший запас довговічності під інтенсивним рухом. У лабораторних випробуваннях SBS-полімер часто дає поліпшення колієстійкості лише до межі нормативу, тоді як AVE18 виходить на новий рівень показників (близько половини нормативної границі). Таким чином, мета розширити «робоче вікно» бітуму досягається: асфальтобетон стає більш стійким до пластичних деформацій за високих температур без погіршення показників міцності на низьких температурах (що підтверджено збереженням достатньо високого R_{50} і відсутністю ознак крихкості).

Механізм дії полімерної добавки. Ефективність AVE18 пояснюється особливостями її реологічної дії у бітумі. До складу добавки входять клейові термоеластоласти – полімери, які при змішуванні з розігрітим бітумом розчиняються або набухають у його маслістій (мальтеновій) фазі, утворюючи дисперсну полімерну сітку. Ця сітка виконує дві основні функції: (1) надає бітуму еластичності і підвищує його здатність пружно деформуватися під навантаженням, і (2) слугує своєрідним «клеєм» між бітумом і мінеральними частками, покращуючи адгезію. За рахунок першого ефекту уповільнюється зсувне течіння мастики під колесом – бітум менш схильний перетікати, отже колія розвивається повільніше. Другий ефект сприяє опору дії води і навантажень: міцніший зв'язок «бітум–мінерал» запобігає викришуванню та передчасному руйнуванню структури асфальтобетону. При цьому AVE18 не містить жорстких полімерів, які надмірно підвищують в'язкість і можуть зробити бітум крихким на холоді – навпаки, термоеластоласт зберігає еластичність і не погіршує низькотемпературні властивості в'язучого. В цілому, механізм дії AVE18 можна охарактеризувати як створення в бітумі тонкої дисперсної полімерної фази, що підсилює структурний каркас бітуму без фазового розшарування і збереженням оптимальної в'язко-пружної рівноваги. Це відрізняється від звичайних SBS-модифікацій, де полімерні мікроструктури можуть випадати в окрему фазу при зберіганні або вимагати хімічних зшиваючих агентів для стабільності.

Відповідність нормативним вимогам. Важливим аспектом впровадження будь-якої нової добавки є перевірка її відповідності чинним стандартам і технічним умовам. Як було зазначено, результати випробувань асфальтобетону з AVE18 повністю відповідають вимогам національного стандарту України ДСТУ 8959:2019 «Асфальтобетон дорожній на основі бітумів, модифікованих полімерами. Технічні умови» та аналогічним стандартам Республіки Казахстан (СТ РК 1223:2019 – для полімер-асфальтобетону і СТ РК 2373:2019 – для щебенево-мастикового полімер-асфальтобетону). Зокрема, показники міцності ($R_{so} \geq 1,0$ МПа) і колієстійкості (≤ 3 мм) навіть перевищують встановлені мінімальні значення, що підтверджує придатність AVE18 для використання у верхніх шарах покриттів категорії І–ІІ (магістральні дороги, аеродроми). Таким чином, з нормативної точки зору застосування цієї добавки є обґрунтованим: лабораторні дослідження в Україні, Грузії та Казахстані засвідчили, що асфальтобетон з AVE18 відповідає усім критеріям, які пред'являються до полімер-модифікованих сумішей за вітчизняними та міжнародними стандартами. Звичайно, для кожного конкретного проекту рекомендується додаткова перевірка – враховуючи можливу варіацію властивостей місцевого бітуму та матеріалів, доцільно виконувати лабораторну валідацію складу асфальтобетону перед масовим застосуванням.

Обмеження та напрями подальших досліджень. Хоча результати є багатообіцяючими, слід відмітити, що ефективність полімерної модифікації певною мірою залежить від якості вихідного бітуму та складу асфальтобетонної суміші. Якщо бітум має нестандартний фракційний склад або містить багато асфальтенів, його здатність до взаємодії з полімером може знижуватися. У таких випадках можливе зменшення ефекту від AVE18 або потреба підбору оптимальної дози понад базові 2 %. Тому рекомендується для кожного нового родовища бітуму проводити попередню оптимізацію режимів модифікації і складу суміші (наприклад, підбирати вміст добавки, вводити пластифікуючі агенти чи адгезійні присадки за потреби). Що стосується інших властивостей покриття, не розглянутих детально у даній роботі – таких як довготривала втомна витривалість, тріщиностійкість при мінусових температурах, тощо – їх слід вивчити в рамках розширених досліджень. Зокрема, доцільно провести випробування на втому (циклічне навантаження на згин) для оцінки тривалості життя покриття з AVE18 під багаторічними навантаженнями. Також варто здійснити моніторинг реальних дорожніх ділянок, влаштованих з використанням AVE18, протягом 1–3–5 років, щоб підтвердити довговічність у природних умовах. Ці дані допоможуть остаточно оцінити, чи не впливає спрощення технології (нижча температура, відсутність млина тощо) на інші експлуатаційні показники в довгостроковій перспективі.

Економічна ефективність. Впровадження полімерної добавки AVE18, окрім технологічних переваг, має і економічний сенс. Проведемо аналіз, за рахунок яких факторів досягається економія коштів у порівнянні з традиційною технологією SBS-модифікації бітуму:

Температура та тривалість процесу: AVE18 працює при $\sim 175\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ і 2–4 год, тоді як для SBS необхідно $\sim 190\text{--}195\text{ }^{\circ}\text{C}$ і 6–10 год безперервного нагріву[23]. Отже, кожна тонна бітуму вимагає менше палива на нагрів (економія газу або мазуту на 10–20 %) і менше електроенергії на перемішування. Скорочення часу перебування бітуму на високій температурі також зменшує теплові втрати. В сумі це дає відчутне зменшення витрат енергоносіїв.

Витрата полімеру: базова доза AVE18 – 2 % маси бітуму, тоді як стандартний вміст SBS-полімера – близько 3 %. Різниця в 1 мас.% означає, що на кожні 100 тонн бітуму використовується на 1 тону менше полімеру. Зважаючи на високу вартість якісних SBS-модифікаторів, це суттєво знижує матеріальні затрати.

Обладнання: відсутність потреби в колоїдному млині означає економію капітальних вкладень (кілька мільйонів гривень на придбання установки) та відсутність витрат на її обслуговування (електроенергія, ремонт, ножі тощо). Крім того, відсутність млина спрощує технологічну схему і зменшує кількість потенційних «вузьких місць», що прискорює запуск виробництва.

Оборотність ємностей: якщо цикл модифікації бітуму скорочується з ~ 8 год до ~ 3 год, одна й та сама ємність (бітуми ємність) може за добу обробити більше порцій бітуму. Це еквівалентно підвищенню продуктивності АБЗ без розширення парку резервуарів. На практиці, застосування AVE18 може дозволити виготовити 2–3 партії ПБВ за робочу зміну замість однієї при SBS-технології. Таким чином, при зростанні потреби в модифікованому бітумі немає потреби збільшувати кількість обладнання – достатньо оптимізувати процес.

Якість бітуму та добавки: менша температура і коротший час нагріву означають менше термічне старіння бітуму. Це, у свою чергу, зменшує потребу в коригувальних добавках (наприклад, пластифікаторах, як-от масла, що інколи додають до пересушеного бітуму). Також знижуються втрати бітуму через випаровування легких фракцій. Відсутність сильного перегріву бітуму сприяє стабільності властивостей кінцевого продукту і зменшує варіативність якості.

Зведений приблизний економічний розрахунок для середнього за масштабами АБЗ (припустимо, випуск модифікованого бітуму 500 т на місяць) показує, що прямі заощадження становлять близько: ≈ 333 тис. грн на місяць за рахунок зменшення витрат полімеру (економія ~ 5 т SBS, якщо прийняти його ціну ~ 2000 \$/т), + ~ 33 тис. грн на енергоносіях (газ/мазут для нагріву, електроенергія для мішалок) – разом орієнтовно ~ 366 тис. грн/міс. Додатково є непрямі вигоди, які важче кількісно оцінити: відсутність амортизаційних відрахувань на колоїдний млин, менший знос пальників та мішалок через нижчі режими роботи, більша гнучкість виробничого планування (швидша готовність партії дозволяє краще пристосуватися до графіку укладання покриття). Таким чином, технологія AVE18 є не лише технічно, але й економічно доцільною. Хоча сама добавка також має свою вартість, наведені розрахунки показують, що супутня економія цілком компенсує ці витрати. На пілотному впровадженні, за інформацією від виробника, економія палива практично зрівноважила затрати на AVE18, а для більших об'ємів прогнозується навіть чистий економічний вигаш. Отже, впровадження цієї енергозберігаючої технології може здійснюватися без підвищення собівартості продукції, а потенційно – із зниженням витрат у довгостроковому періоді.

Висновки. Полімерна добавка AVE18 VELETON™ ефективно підвищує міцність і температурну стійкість асфальтобетону. Лабораторні випробування показали зростання показників, що вдвічі перевищує мінімально необхідний рівень після теплового навантаження. Таким чином, забезпечується ширший інтервал працездатності дорожнього покриття: матеріал зберігає високі пружні властивості навіть після тривалої дії підвищеної температури.

Використання AVE18 різко підвищує стійкість покриття до утворення колії. Досягнутий рівень колієстійкості ($\sim 1,0$ мм за 10 тис. проходів колеса) більш ніж удвічі кращий за гранично допустимий (3 мм). Це означає значний запас довговічності: покриття буде деформуватися значно повільніше під навантаженнями, що подовжує строк служби дороги. Практичний досвід (Україна, Грузія, Казахстан) підтверджує лабораторні дані – на випробувальних ділянках отримано колію близько 1,2–1,4 мм, що гарантує високий опір пластичним деформаціям у реальних умовах.

Добавка AVE18 забезпечує технологічні переваги та енергоощадність. Для модифікації бітуму не потрібні екстремальні режими: робоча температура на $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ нижча, а час змішування в 2–3 рази

коротший, ніж для SBS. Це знижує енергоспоживання й ризик старіння в'язучого. AVE18 вводиться гранулами без колоїдного млина, що спрощує процес і усуває додаткові витрати на обладнання. Менша базова доза (2 % проти ~3 % для SBS) означає менше споживання дорогого полімеру при збереженні або покращенні характеристик покриття.

Економічна доцільність підтверджена розрахунками. Комплексний аналіз показує, що завдяки зниженню витрат полімеру та палива технологія з AVE18 може бути впроваджена без збільшення собівартості асфальтобетону. Навпаки, для типового виробництва очікується економія коштів: скорочення паливно-енергетичних витрат на ~20 % і зменшення витрат на сировину компенсують вартість добавки. Отриманий ефект – підвищення продуктивності і зниження питомих витрат – робить технологію конкурентоспроможною для широкого застосування.

Рекомендовано широкое впровадження AVE18 для покращення довговічності доріг. Результати дослідження і позитивний досвід застосування дають підстави рекомендувати використання цієї полімерної добавки при будівництві та ремонтах важконавантажених автомобільних доріг і аеродромів. Доцільно оновити галузеві нормативні документи, включивши положення щодо використання сучасних полімерних добавок сухого вводу, а дорожнім службам – передбачати застосування модифікованого бітуму в технічних вимогах на об'єктах з інтенсивним рухом. Подальші наукові дослідження мають бути спрямовані на моніторинг довговічності покриттів з AVE18 та оптимізацію складів сумішей під різні кліматичні умови. Загалом, технологія полімерної модифікації бітуму із використанням AVE18 здатна зробити вагомий внесок у підвищення стійкості транспортної інфраструктури, зменшення витрат на її утримання та покращення якості дорожнього покриття в Україні.

Перспективність впровадження. Технологія модифікації бітуму сухою полімерною добавкою AVE18 має значний потенціал для широкого впровадження у дорожньому господарстві. На сьогодні нормативна база в Україні вже частково готова до застосування полімер-асфальтобетонів: діє стандарт ДСТУ 8959:2019, який регламентує вимоги до сумішей на модифікованому бітумі, а також низка супутніх стандартів (ДСТУ В В.2.7-135 тощо) щодо методів випробувань таких матеріалів. Наступним кроком має стати масштабування використання нової добавки з рівня лабораторних і пілотних випробувань до рівня повномасштабних проєктів. Доцільно організувати демонстраційні ділянки з покриттям на AVE18 на дорогах різних категорій – особливо на тих, де проблема колієутворення стоїть найгостріше (міські магістралі, маршрути громадського транспорту, під'їзди до портів та елеваторів, аеродроми). Після отримання позитивних результатів варто включати вимогу використання полімер-модифікованого бітуму (зокрема через такі добавки, як AVE18) у тендерні умови на будівництво і капітальний ремонт відповідних об'єктів.

Важливим фактором успішного впровадження є інформаційно-технічна підтримка та навчання персоналу. Нову технологію необхідно популяризувати серед дорожніх підрядників – проводити семінари, тренінги, публікувати методичні рекомендації з використання AVE18. Оператори АБЗ повинні бути обізнані з особливостями приготування модифікованого бітуму, контролю якості (перевірка однорідності, в'язкості) та введення його в асфальтозмішувач. Така просвітницька робота допоможе зняти острах перед новою добавкою та забезпечити правильне дотримання технології на практиці.

Перспективним напрямом подальшої роботи є адаптація технології AVE18 до різних умов: підбір оптимальних складів для холодніших кліматичних зон (можливо, у поєднанні з пластифікаторами для поліпшення низькотемпературних властивостей), дослідження довговічності покриттів з AVE18 в умовах реального руху (моніторинг впродовж кількох років) та удосконалення самої добавки з метою здешевлення (використання більш доступних полімерних компонентів, вторинної сировини тощо). Світовий досвід свідчить, що застосування полімер-модифікованих асфальтобетонів невпинно зростає: у ряді країн частка такого покриття перевищує 30–50 %, що дозволяє підвищити міжремонтні терміни без негативного впливу на економіку будівництва. Україна має змогу перейняти ці найкращі практики. Зважаючи на стратегічну мету розвитку довговічної та стійкої дорожньої інфраструктури, впровадження сучасних полімерних добавок таких, як AVE18, є на часі. Очікується, що екологічні та економічні вигоди (зменшення перевитрати бітуму, енергоресурсів, відходів ремонту) сприятимуть підтримці цієї технології на державному рівні. В перспективі застосування ефективних полімерних модифікаторів стане невід'ємною частиною стандартів будівництва якісних та довговічних доріг.

Перелік посилань

1. ДСТУ 8959:2019. Асфальтобетонні суміші та асфальтобетон дорожні на основі бітумів, модифікованих полімерами. Технічні умови. Київ : Мінрегіон України, 2019. 14 с.
2. СТ РК 1223–2019. Суміші полімерасфальтобетонні дорожні, аеродромні і полімерасфальтобетон. Технічні умови. Астана : Комітет технічного регулювання та метрології РК, 2019. 48 с.
3. СТ РК 2373–2019. Суміші щебенево-мастикові полімерасфальтобетонні дорожні, аеродромні і щебенево-мастиковий полімерасфальтобетон. Технічні умови. Астана : Комітет технічного регулювання та метрології РК, 2019. 52 с.
4. Копинець І. В., Соколов О. В., Желтобрюх А. Д., Головченко В. С. Дослідження ефективності полімерних модифікаторів бітуму у важких асфальтобетонах. *Дороги і мости*. 2019. Вип. 19–20. С. 94–106.
5. Аюпов Д. А., Потапова Л. І., Мурафа А. В. та ін. Дослідження особливостей взаємодії бітумів з полімерами. *Відомості КазДАБУ: Будівельні матеріали та вироби*. 2011. № 1. С. 140–146.
6. Porto M. et al. Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances. *Applied Sciences*. 2019. 9(4): 742.
7. Yildirim Y. Polymer Modified Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*. 2007. 21(1). P. 66–72.
8. ДСТУ В EN 12697-22:2011. Бітумні суміші. Методи випробування гарячих асфальтобетонних сумішей. Частина 22: Визначення колієстійкості з використанням установки для колієутворення (в т.ч. методика «Гамбурзького колеса»). Київ : Мінекономрозвитку України, 2011.
9. AASHTO T324-19. Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. Washington, DC : AASHTO, 2019.
10. EN 13108-1:2016. Bituminous mixtures — Material specifications — Part 1: Asphalt Concrete. Brussels : CEN, 2016.
11. Airey G. D. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*. 2004. 83(14–15). P. 1709–1719.
12. Lu X., Isacsson U. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers. *Polymer Testing*. 2001. 20(1). P. 77–86.
13. Read J., Whiteoak D. The Shell Bitumen Handbook. 6th ed. London : ICE Publishing, 2015.
14. СТ РК 1218-2024. Матеріали на основі органічних в'язучих для дорожнього і аеродромного будівництва. Методи випробувань. Астана : КТПМ РК, 2024.

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

Moroz Vadym S., Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-mail: v.moroz.lion@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-5554-6086>

Summary. The article systematizes the results of laboratory tests of the VELETON™ “AVE18” polymer additive for the modification of bitumens and asphalt concrete mixes. Based on test reports (National Transport University, Kyiv; JSC “KazDorNDI”; SE “Center of Quality”, Astana), key performance indicators of polymer-modified asphalts are summarized: increased strength (R_0 , R_{20} up to 6 MPa; R_{50} up to 2.4 MPa) and markedly improved rutting resistance—rut depth of ~1.2–1.4 mm after 20,000 passes in the Hamburg wheel tracking test (limit ≤ 3 mm). It is shown that AVE18 is an effective alternative to latexes and SBS-polymer systems: it requires a lower bitumen modification temperature (175–180 °C) and a shorter time to obtain a stable modified binder (2–4 h), exhibits a short thermal stabilization period (~30 min), and has reduced susceptibility to phase separation. Technological advantages for asphalt plants are outlined (no colloid mill required; typical dosage 2%), along with the mechanism of action (adhesive thermoplastic elastomers that enhance the viscoelastic properties of the binder) and compliance with DSTU 8959:2019, ST RK 1223:2019,

and ST RK 2373:2019. Practical recommendations are provided for dosage and quality control of the modified binder. An economic effect is estimated: due to lower polymer consumption, reduced energy use, and higher productivity, AVE18 makes bitumen modification more cost-effective. The feasibility of wide implementation of AVE18 to extend pavement service life is substantiated, and avenues for further research and application are outlined.

Keywords: AVE18 VELETON™; modified bitumen; dry-add polymer; SBS; thermoplastic elastomer; rutting resistance; $R_0/R_{20}/R_{50}$ indices; Hamburg wheel tracking test; polymer asphalt concrete.

References

1. DSTU 8959:2019 (2019) *Asfaltobetonni sumishi ta asfaltobeton dorozhni na osnovi bitumiv, modyfikovanykh polimeramy. Tekhnichni umovy* [Asphalt concrete mixtures and asphalt concrete road based on bitumens modified by polymers. Specifications]. Kyiv: Minrekhion Ukrainy. 14 p. [In Ukrainian].
2. ST RK 1223–2019 (2019) *Sumishi polymerasfaltobetonni dorozhni, aerodromni i polymerasfaltobeton. Tekhnichni umovy* [Polymer-asphalt concrete mixtures road, airfield and polymer-asphalt concrete. Specifications]. Astana: Komitet tekhnichnoho rehulivannia ta metrolohii RK. 48 p. [In Kazakh/English].
3. ST RK 2373–2019 (2019) *Sumishi shchebenevo-mastykovi polymerasfaltobetonni dorozhni, aerodromni i shchebenevo-mastykovi polymerasfaltobeton. Tekhnichni umovy* [Stone mastic polymer-asphalt concrete mixtures road, airfield and stone mastic polymer-asphalt concrete. Specifications]. Astana: Komitet tekhnichnoho rehulivannia ta metrolohii RK. 52 p. [In Kazakh/English].
4. Kopynets, I. V., Sokolov, O. V., Zheltobriukh, A. D. and Holovchenko, V. S. (2019) 'Research on the effectiveness of polymer bitumen modifiers in heavy asphalt concrete', *Dorohy i mosty* [Roads and Bridges], (19–20), pp. 94–106. [In Ukrainian].
5. Aiupov, D. A., Potapova, L. I., Murafa, A. V. et al. (2011) 'Study of the features of interaction of bitumens with polymers', *Izvestiia KazGASU: Stroitelnye materialy i izdeliia* [News of the KSUAE: Building materials and products], (1), pp. 140–146. [In Kazakh].
6. Porto, M. et al. (2019) 'Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances', *Applied Sciences*, 9(4), 742.
7. Yildirim, Y. (2007) 'Polymer Modified Asphalt Binders', *Construction and Building Materials*, 21(1), pp. 66–72.
8. DSTU B EN 12697-22:2011 (2011) *Bitumni sumishi. Metody vyprovuvannia hariachykh asfaltobetonnykh sumishei. Chastyna 22: Vyznachennia koliiestistikosti z vykorystanniam ustanovky dlia koliiieutvorennia (v t.ch. metodyka «Hamburzkoho koleasa»)* [Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracking]. Kyiv: Minekonomrosvytuku Ukrainy. [In Ukrainian].
9. AASHTO T324-19 (2019) *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures*. Washington, DC: AASHTO.
10. EN 13108-1:2016 (2016) *Bituminous mixtures — Material specifications — Part 1: Asphalt Concrete*. Brussels: CEN.
11. Airey, G. D. (2004) 'Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens', *Fuel*, 83(14–15), pp. 1709–1719.
12. Lu, X. and Isacsson, U. (2001) 'Modification of road bitumens with thermoplastic polymers', *Polymer Testing*, 20(1), pp. 67–86.
13. Read, J. and Whiteoak, D. (2015) *The Shell Bitumen Handbook*. 6th ed. London: ICE Publishing.
14. ST RK 1218-2024 (2024) *Materialy na osnovi orhanichnykh viazhuchykh dlia dorozhnoho i aerodromnoho budivnytstva. Metody vyprovuvannia* [Materials based on organic binders for road and airfield construction. Test methods]. Astana: KTRM RK. [In Kazakh/English].

Дата надходження до редакції 18.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 06.01.2026.

УДК 625.7:528.71
UDC 625.7:528.71

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-285-297

**КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ВІЗУАЛЬНОГО
ОБСТЕЖЕННЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННИХ ДОРОЖНИХ ПОКРИТТІВ З ШАРОМ
ЗНОШУВАННЯ НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ YOLOV8-SEG ДЛЯ СИСТЕМ
ПРЕДИКТИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА УПРАВЛІННЯ ІНФРАСТРУКТУРОЮ**

**COMPREHENSIVE METHODOLOGY OF AUTOMATED VISUAL INSPECTION OF
CEMENT CONCRETE ROAD PAVEMENT WITH WEAR LAYER BASED ON THE YOLOV8-
SEG NEURAL NETWORK FOR PREDICTIVE DIAGNOSTICS AND INFRASTRUCTURE
MANAGEMENT SYSTEMS**



Оксень Дмитро Євгенович, Tutorpeers LLC, магістр, Київ, Україна, e-mail: dmytro.oksen@tutorpeers.com, тел.: +380506744778,

<https://orcid.org/0009-0005-8280-4604>.



*Оксень Євген Іванович, Національний транспортний університет, доктор
технічних наук, професор, Київ, Україна, e-mail: eioksen@gmail.com, тел.:
+380506744778,*

<https://orcid.org/0000-0003-1075-6840>.

Анотація: Дослідження в роботі спрямовані на виявлення та просторову сегментацію, класифікацію та геоінформаційний аналіз дефектів цементобетонних покриттів з шаром зношування. Методика покликана слугувати основою для формування цифрової моделі стану покриття як інструменту предикативної діагностики. В якості ядра методики обрано нейронну мережу YOLOv8-seg, оптимізовану для задач інстанс-сегментації в реальному часі. Розроблено повний технологічний ланцюг, що включає: 1) мобільну зйомку з синхронною GNSS-прив'язкою; 2) формування спеціалізованого датасету з п'ятьма класами, адаптованими до особливостей комбінованого покриття; 3) активне навчання моделі на розмічених полігональних масках; 4) постобробку та об'єднання масок з різних кадрів; 5) генерацію векторних шарів дефектів у GeoJSON-форматі та їх інтеграцію в ГІС; 6) автоматичний розрахунок ключових показників технічного стану (індекс руйнування, щільність дефектів). Апробація проведена на ділянках автомобільної дороги загального користування М-07 Київ – Ковель. Система забезпечила піксельну сегментацію дефектів із середньою точністю (mAP50-seg) 0,87 на тестовій вибірці. Кількісний аналіз виявив, що лише 58,2 % площі покриття знаходиться у справному стані, тоді як частково зруйновані ділянки становлять 32,6 %, а повністю зруйновані – 9,2 %. Глибокий просторовий аналіз виявив статистично значущу кореляцію між зонами концентрації дефектів типу «зруйноване покриття» та точками динамічного навантаження (зупинки, з'їзди, ділянки гальмування). Це дозволило класифікувати 92 % всіх значних руйнувань як «навантажено-залежні». Розроблена методика довела можливість повної автоматизації процесу отримання об'єктивних,

метрологічно валідних даних про стан покриття. Результати досліджень не лише кількісно описують стан, але й через просторовий аналіз вказують на його причини. Це дозволяє перейти від планово-запобіжних ремонтів до цільових, технологічно обґрунтованих втручань. Система формує цифровий слід об'єкта, що є критично важливим першим кроком до створення його предикативної цифрової моделі. Подальші дослідження будуть спрямовані на інтеграцію даних візуального обстеження з результатами безконтактних дефектоскопічних методів (наприклад, георадарного зондування) для оцінки стану не лише поверхні, а й внутрішніх шарів конструкції.

Ключові слова: автоматизоване обстеження, цементобетонне покриття, шар зношування, нейронна мережа, YOLOv8-seg, інстанс-сегментація, геоінформаційна система, предикативне управління, цифровий двійник, просторовий аналіз, навантажено-залежний дефект.

Вступ. Експлуатаційна надійність та довговічність автомобільних доріг безпосередньо залежать від своєчасності та адекватності оцінки їх технічного стану. Особливої уваги потребують ділянки з цементобетонним покриттям, поверх яких для поліпшення експлуатаційних характеристик нанесено тонкий зношувальний шар з асфальтобетону. Така комбінована структура схильна до специфічних дефектів, серед яких найбільш критичними є відбиті тріщини, що виникають унаслідок деформацій бетонних плит і проявляються крізь верхній шар, а також деламінація та локальні руйнування асфальтобетонного шару [1, 2]. Діагностика цих дефектів традиційними методами, що базуються на візуальному огляді фахівцями, є трудомісткою, коштовною та не позбавленою суб'єктивізму. Крім того, результатом такого огляду зазвичай є якісний опис або грубі ескізи, що не дозволяють отримати точні кількісні показники (площі, лінійні розміри, щільність розподілу), необхідні для пріоритизації ремонтів, калькуляції ресурсів та прогнозування залишкового ресурсу конструкції.

Світовий досвід останнього десятиліття свідчить про інтенсивне впровадження методів комп'ютерного зору та глибокого навчання в галузі моніторингу інфраструктури [3, 4]. Моделі сімейства YOLO (You Only Look Once), зокрема остання версія YOLOv8, що включає функцію інстанс-сегментації (YOLOv8-seg), довели свою ефективність для завдань виявлення дорожніх дефектів у реальному часі, поєднуючи високу точність з достатньою швидкістю для вбудовування в мобільні системи [5, 6]. Незважаючи на наявність публічних датасетів та досліджень, присвячених аналізу асфальтобетонних покриттів [7–10], питома методика, цілісно адаптована саме до особливостей діагностики цементобетонних покриттів з шаром зношування, у науковій літературі розроблена недостатньо. Існуючі рішення часто зосереджені лише на фазі детекції, не забезпечуючи повноцінного технологічного ланцюжка від збору даних до отримання інженерно-значущих результатів у прив'язці до місцевості.

Мета роботи – розробка, технічна реалізація та комплексна апробація методики автоматизованого візуального обстеження, що забезпечує не лише виявлення, але й точну сегментацію, класифікацію та просторовий аналіз дефектів цементобетонних покриттів з шаром зношування. Запропонований підхід покликаний слугувати основою для формування цифрової інформаційної моделі стану покриття, що є критичним першим кроком до створення систем предикативної діагностики та управління ресурсом дорожньої інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. Розроблена методика являє собою послідовний технологічний процес, який може бути поділений на вісім взаємопов'язаних етапів, що забезпечують перехід від сирих польових даних до структурованих інженерних висновків.

Збір первинних даних. Початковим етапом є організація збору первинних даних. Зйомка проводиться з рухомого транспортного засобу, обладнаного камерою високої роздільної здатності, жорстко закріпленою таким чином, щоб забезпечити повне охоплення смуги руху під оптимальним кутом. Критично важливим є синхронна фіксація відеопотоку та даних GPS з можливістю додаткового використання даних інерційного блоку (IMU) для точної прив'язки. Швидкість руху обмежується діапазоном 40–60 км/год, що дозволяє отримати достатню різкість зображення для аналізу дрібних дефектів при забезпеченні високої продуктивності обстеження.

Формування навчального датасету. Наступна фаза включає попередню обробку відео та формування навчального датасету. Відеопотік розділяється на окремі кадри з частотою 5–30 кадрів на секунду. Отримані зображення проходять корекцію яскравості та контрасту для компенсації впливу змінних умов освітлення. Для навчання та подальшої роботи моделі було розроблено спеціалізовану систему класифікації, адаптовану до специфіки об'єкта дослідження. Система включає п'ять основних класів: «справне покриття», «частково зруйноване покриття» (дрібні тріщини, початкова деламінація), «зруйноване покриття» (вибоїни, сітчасті тріщини), «поздовжній шов» та «поперечний шов». Така деталізація дозволяє не тільки ідентифікувати факт наявності дефекту, але й диференціювати ступінь його тяжкості, що має ключове значення для планування ремонтних заходів.

Якість роботи будь-якої нейромережевої моделі фундаментально залежить від якості розмітки даних. Тому етап анотації (ручної розмітки) є одним з найбільш відповідальних. Для моделі сегментації YOLOv8-seg були створені полігональні маски, що точно окреслюють межі кожного об'єкта на зображенні. Під час розмітки дотримувалися суворих правил: точне відтворення геометрії дефекту (особливо для тонких тріщин), однозначне віднесення до класу та обов'язкове врахування особливостей проявлення відбитих тріщин, які можуть мати менш виражений контур через наявність верхнього шару. Навчання моделі YOLOv8-seg проводилося з урахуванням вимог до подальшого її використання в мобільному комплексі. Була обрана архітектура yolov8m-seg, що забезпечує оптимальний баланс між швидкістю та точністю. Для підвищення узагальнюючої здатності моделі та її стійкості до різноманітних умов зйомки (різне освітлення, погода, наявність тіней) активно застосовувалися техніки аугментації даних: випадкові зміни яскравості, контрасту, додавання гауссового шуму, незначні афінні перетворення.

Валідація на окремому наборі даних. Після навчання модель проходила ретельну валідацію на окремому наборі даних, що не використовувався під час тренування. Основною метрикою оцінки була обрана середня точність сегментації (mAP50-seg). Після підтвердження якості модель переводилася в режим інференсу – автоматичної обробки нових відеопотоків. Для кожного кадру система генерувала полігони (маски) навколо виявлених дефектів, кожен з яких містив мітку класу та координати обмежувального прямокутника. Оскільки модель аналізує кожен кадр окремо, наступним критичним кроком є постобробка отриманих результатів. Її мета – трансформувати набір розрізнених полігонів з різних кадрів у цілісну цифрову карту дефектів. На цьому етапі виконується об'єднання масок одного класу, що належать одному фізичному дефекту, фільтрація дрібних шумових контурів, а також агрегація даних на основі GPS-координат. Результатом постобробки є векторний шар у форматі GeoJSON або Shapefile, де кожен об'єкт-полігон містить атрибутивну інформацію: тип дефекту, розраховану площу, довжину (для лінійних об'єктів), середню ширину та точні географічні координати. Цей шар безпосередньо імпортується в геоінформаційні системи (наприклад, QGIS, ArcGIS) або візуалізується в веб-браузері з використанням картографічних сервісів, таких як OpenStreetMap.

Фотограметричне калібрування камери. Для розрахунків розмірів дефектів застосовувалася теорія машинного бачення [11–13]. Приклади реалізації положень цієї теорії для практичних розрахунків наведено в пакеті OpenCV [14]. Для усунення впливу радіальної та тангенціальної дисторсії об'єктива було проведено фотограметричне калібрування камери за методом Чжана [13]. Було використано набір із 20 зображень калібрувальної шахівниці з відомим розміром елемента (довжина сторони квадрата – 50 мм). При калібруванні камери використовувалася правостороння система координат камери (рис. 1), де вісь Z спрямована вздовж оптичної осі, а осі X та Y – вправо та вниз відповідно, що узгоджується з піксельною системою координат зображення x – y з початком у лівому верхньому куті.

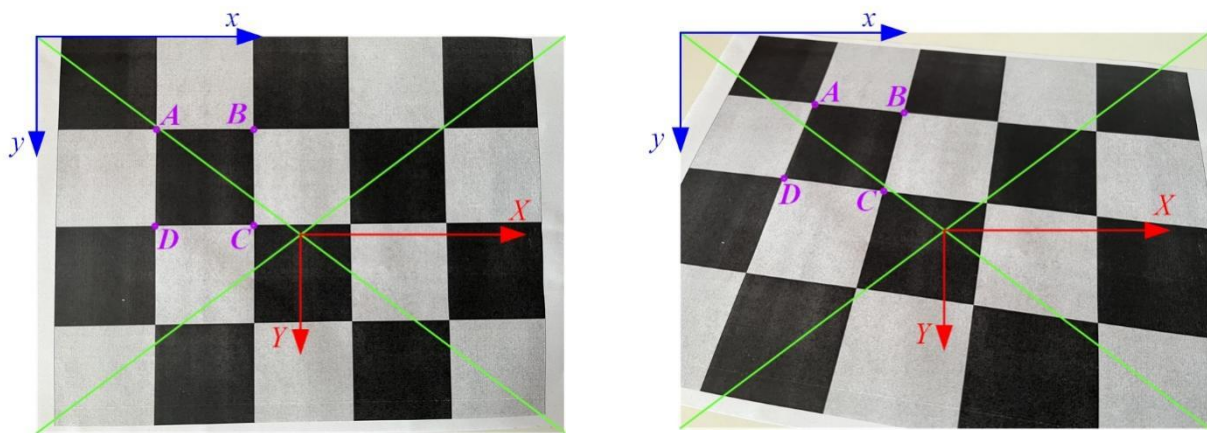


Рисунок 1 – Фотограмметричне калібрування камери за методом Чжана
Figure 1 – Photogrammetric camera calibration using Zhang's method

Процес фотограмметричного калібрування можна представити як ланцюжок перетворень (рис. 2) між такими системами координат:

- світова система координат (World Coordinate System – WCS);
- система координат камери (Camera Coordinate System – CCS);
- система координат пікселів зображення (Image Pixel Coordinates – IPC) з дисторсією.



Рисунок 2 – Ланцюжок перетворень при фотограмметричному калібрування камери
Figure 2 – Transformation chain for photogrammetric camera calibration

Коефіцієнти дисторсії розраховувалися для нормалізованих координат на одиничній фокальній площині цієї системи. За допомогою бібліотеки OpenCV були обчислені матриця внутрішніх параметрів камери та коефіцієнти дисторсії. Усі польові зображення, отримані під час обстеження, проходили попередню корекцію дисторсії об'єктива. Використовуючи отримані під час калібрування коефіцієнти k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 та матрицю внутрішніх параметрів камери K , до кожного кадру застосовувалась функція виправлення дисторсії з бібліотеки OpenCV (`cv2.undistort()`). Для підвищення продуктивності обробки відеопотоку в режимі, близькому до реального часу, були попередньо обчислені та використані мапи перетворення (`cv2.initUndistortRectifyMap()` та `cv2.remap()`). Після корекції зображення кадрувались за областю повної видимості (ROI) для усунення чорних країв, а координати усіх виявлених об'єктів корегувались з урахуванням цього зсуву для збереження точності геоприв'язки.

Розрахунку координат вузлових точок за моделлю перспективи. Реальна камера з кутом нахилу реалізує перспективну проекцію, яка описується гомографією – лінійним перетворенням у однорідних координатах, що відображає точку на площині дороги (X, Y) в піксель на зображенні (u, v) .

Матриця гомографії H розміром 3×3 визначає це перетворення:

$$\begin{bmatrix} wu \\ wv \\ w \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де w – масштабний коефіцієнт.



Рисунок 3 – Розташування еталонного квадрата на кадрі ділянки дороги

Figure 3 – Location of the reference square on the road section frame

Калібрування та визначення матриці гомографії H здійснювалося наступним чином. Для розрахунків приймаємо наступні системи координат:

- піксельну систему координат $u, x - O_{px} - v, y$ (розташована на кадрі, зображенні). Початок системи координат знаходиться у верхньому лівому куті кадру. Координати точки довільної точки – (u, v) , де u зростає праворуч, v зростає униз. Одиниці вимірювання – пікселі (порядковий номер елемента растру). Координати розраховуються з субпіксельною точністю і зберігаються як дійсні числа, але фізично таке положення всередині пікселя відтворити неможливо, оскільки пікселі – цілі числа;

- локальну світову систему координат $X_w - O_w - Y_w$. Початок системи координат знаходиться у верхньому лівому куті квадрата на дорозі. Вісь X_w спрямована праворуч, вісь Y_w — униз (для відповідності піксельній системі). Одиниці вимірювання – метри. Це локальна і умовна система координат. Вона ідеально підходить для обчислення відносних розмірів дефектів (площі, довжини) всередині кадру або відносно квадрата. Однак, вона не є абсолютною глобальною системою (наприклад такою як, UTM або WGS 84).

На рис. 3 показано розташування еталонного квадрата з фізичним розміром сторони $L = 4,5$ м. Перевагами такого вибору координатних систем є:

- простота, бо координати інших кутів квадрата стають тривіальними;

– зрозумілість, оскільки будь-яка точка на дорозі тепер має координати (X_w, Y_w) , які інтуїтивно зрозумілі. А саме, на скільки метрів ця точка знаходиться праворуч і нижче від лівого верхнього кута еталонного квадрата;

– фізичний зміст – прямокутна сітка світових координат «накладена» на дорогу так, що її лінії паралельні сторонам квадрата. Таким чином, квадрат служить не тільки еталоном довжини, а й еталоном орієнтації.

При цьому кожна точка на площині поверхні дороги може бути задана вектором координат у світовій системі відліку як:

$$P_w = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Перехід від піксельних координат сегментованих дефектів до їх абсолютних розмірів на площині дороги було застосовано проективне перетворення (гомографію). Обчислення 8 вільних параметрів матриці гомографії H (1) здійснено методами лінійної алгебри (Direct Linear Transform — DLT) зіставленням системи рівнянь, що відповідає кутам еталонного квадрата на зображенні у метричній системі координат дороги та піксельної системи координат кадру. Дев'ятий параметр матриці приймається за «1» для нормування. Ця матриця унікальна для конкретної конфігурації камери – положення, кут нахилу осі об'єктива, фокусна відстань.

Після чого кожна вершина полігонального контуру дефекту трансформувалася в метричну систему за допомогою оберненої матриці H^{-1} . Площа дефекту обчислювалася безпосередньо в метрах за формулою Гауса для отриманого полігона. Даний метод, на відміну від простого масштабування через середній піксельний коефіцієнт, дозволяє для об'єктів, які розташовані в площині еталонного квадрата, точно компенсувати перспективні спотворення, викликані кутом нахилу камери, що забезпечує інваріантність вимірювань до положення дефекту в кадрі.

Перетворення меж дефекту з піксельної площини у світові координати здійснювалася за наступною логікою. Нехай модель YOLOv8-seg визначила дефект як полігон з N вершинами в пікселях: $poly_{px} = \{(u_1, v_1), (u_2, v_2), \dots, (u_N, v_N)\}$. Тобто, для точки на дорозі з однорідними координатами її піксельні координати знаходяться як:

$$\begin{bmatrix} w \cdot u \\ w \cdot v \\ w \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Після нормалізації отримуємо:

$$u = \frac{(H \cdot P_w)_1}{(H \cdot P_w)_3}, \quad v = \frac{(H \cdot P_w)_2}{(H \cdot P_w)_3}, \quad (4)$$

де індекс добутка $(H \cdot P_w)$ позначає відповідну компоненту вектора.

Перехід від пікселів до координат на дорозі відбувається зворотнім чином. Для точки дефекту з піксельними координатами $P_{px} = [u_{px} \quad v_{px} \quad 1]^T$ її реальні координати на дорозі $P_w = [u_w \quad v_w \quad 1]^T$ обчислюються за оберненою гомографією:

$$\begin{bmatrix} w_x \cdot X_w \\ w_y \cdot Y_w \\ w \end{bmatrix} = H^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_{px} \\ v_{px} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Результатом розрахунків за (5) вектор однорідних координат $\begin{bmatrix} w_x \cdot X_w & w_y \cdot Y_w & w \end{bmatrix}^T$, а після їх поділення на масштабний коефіцієнт w отримуємо і координати в локальній світовій системі:

$$X_w = \frac{(H^{-1} \cdot p_{px})_1}{(H^{-1} \cdot p_{px})_3} \text{ та } Y_w = \frac{(H^{-1} \cdot p_{px})_2}{(H^{-1} \cdot p_{px})_3}. \quad (6)$$

Формула (6) є фундаментальною для отримання метрично коректних даних із зображень об'єктів на кадрах, що розташовані в площині поверхні дороги.

Розрахунок розмірів дефектів за моделлю перспективи. Розрахунок площі дефекту за алгоритмом «shoelace» [11, 12] за формулою Гауса здійснюється в наступному порядку. Вихідними даними є результати роботи моделі YOLOv8-seg для одного дефекту у вигляді полігону, що представлений замкнутим ланцюгом з N вершин (рис. 4). Кожна вершина i після перетворень (6) має координати $P_i = (X_i, Y_i)$ в метрах у світовій системі координат.

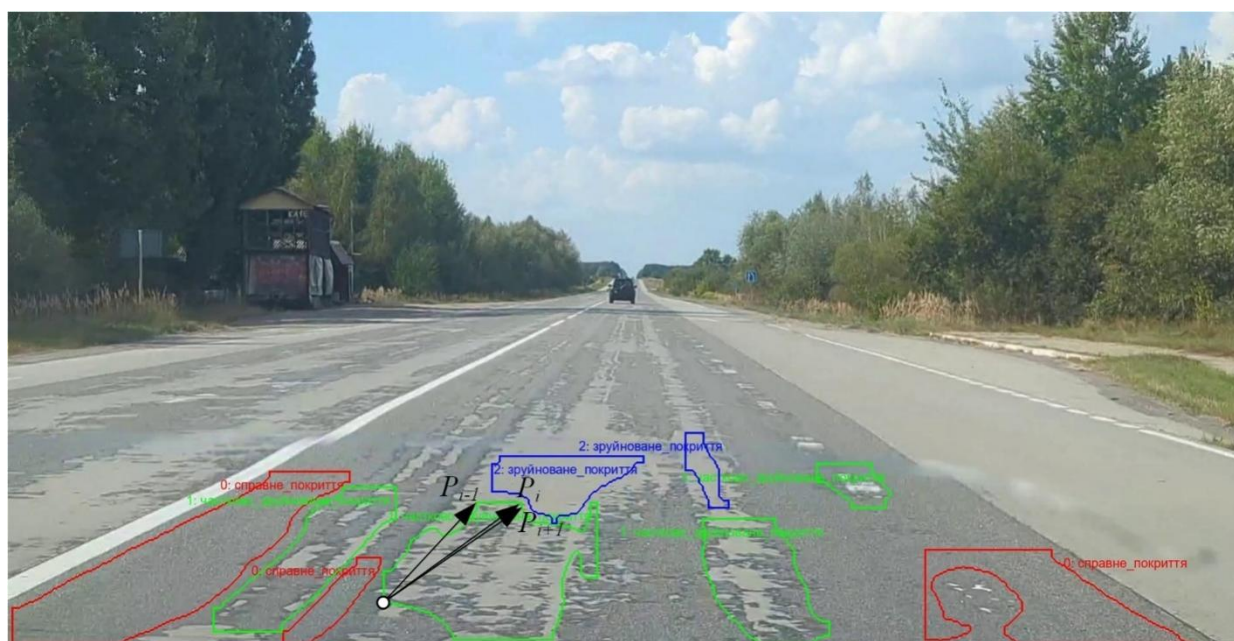


Рисунок 4 – Схема обходу повздовж контуру за формулою Гауса

Figure 4 – Scheme of bypassing the circuit using the Gauss formula

Алгоритм «shoelace» обчислює площу простого (не самоперетинаючогося) полігону, послідовно «обходячи» його вершини. Геометрично він ґрунтується на сумі площ трапецій, утворених кожною стороною полігону та її проекцією на одну з осей. Обхід вершин здійснюється в одному напрямку за годинниковою стрілкою, але допускається обхід і проти годинниковою стрілкою. Тоді площа полігону (замкнений контур дефекту) обчислюється за формулою:

$$S = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^N (X_i \cdot Y_{i+1} - X_{i+1} \cdot Y_i) \right|. \quad (7)$$

Формула (7) передбачає, що вершина з індексом $N+1$ збігається з вершиною 1, тобто: $X_{N+1} \equiv X_1$ та $Y_{N+1} \equiv Y_1$. Таким чином, сума фактично обчислюється для послідовності ребер сегмента відповідного дефекта. Формула Гауса («shoelace») є універсальною, точною та ефективною для полігонів довільної форми, як для опуклих, так і для увігнутих форм сегментів, навіть для складних і неопуклих форм [17]. Для забезпечення чисельної стійкості обчислень із числами з плаваючою комою, особливо при обробці великих полігонів, були дотримані рекомендації щодо мінімізації похибки округлення [18].

Обчислення лінійних розмірів дефектів (довжини та ширини) здійснюється в наступному порядку. Виконується центрування точок полігона (сегмента лінійного дефекту):

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j^w, \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_j^w, \quad c_j = \begin{bmatrix} X_j^w - \bar{X} \\ Y_j^w - \bar{Y} \end{bmatrix} \quad \text{для } j=1 \dots N. \quad (8)$$

Обчислюється коваріаційна матриця розподілу точок вершин полігону:

$$C = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N c_j c_j^T = \begin{bmatrix} \text{Cov}(X, X) & \text{Cov}(X, Y) \\ \text{Cov}(Y, X) & \text{Cov}(Y, Y) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Розв'язанням характеристичного рівняння (9) отримуємо власні значення для матриці C як λ_1 та λ_2 (при цьому приймаємо $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq 0$). Тоді довжина та ширина дефекту відповідно:

$$L_d = 2\sqrt{2\lambda_1} \quad \text{та} \quad B_d = 2\sqrt{2\lambda_2}. \quad (10)$$

Множник $2\sqrt{2} \approx 2,83$ відповідає правилу « 2σ » для апроксимації розмірів еліпса розсіювання точок полігона. Для більш консервативної оцінки можна використовувати множник 4 (правило « 3σ »). Застосування залежностей (10) дозволяє здійснити статистичне оцінювання розмірів лінійних дефектів і урахувати їх складну форму.

Оцінка похибок калібрування. Загальна похибка визначення лінійних розмірів на площині дороги (відстані, розміри, координати) k формується з наступних складових:

- δ_L – похибки розмітки еталону;
- δ_{px} – похибки визначення меж у пікселях;
- δ_{plane} – похибки через неідеальність площини (нахил, нерівності).

При чому, значення складових похибки для типових умов може знаходитися в межах для:

- похибки розмітки еталону $\pm 0,01$ м;
- похибки визначення меж у пікселях $\pm 0,5$ пкс.

Похибки через неідеальність площини можуть бути оцінені за допомогою коефіцієнта рівності дороги IRI , наприклад, 4–5 мм/м.

Як що для умов вимірювання дефектів цементобетонних дорожніх покриттів з шаром зношування (див. рис. 3) прийняти довжину сторони еталонного квадрату $L_{et} = 4,5$ м, середню

довжину проєкції сторони квадрату на кадрі $\bar{P}_{et} \approx 300$ пкс, то відносна похибка коефіцієнта k може бути оцінена як:

$$\frac{\Delta k}{k} \approx \sqrt{\left(\frac{\delta_L}{L_{et}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{px}}{\bar{P}_{et}}\right)^2 + \left(\frac{IRI}{1000}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,01}{4,5}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{300}\right)^2 + \left(\frac{5}{1000}\right)^2} = 0,00572, \quad (11)$$

або 0,572 %. Отримана оцінка похибок калібрування є прийнятною для використання при кількісному оцінюванні ступені пошкодження дорожнього покриття. Наведена процедура калібрування та вимірювання є практично реалізованим інженерним компромісом між точністю та складністю. Вона дозволяє отримати метрично прив'язані дані, достатні для задач моніторингу та паспортизації, з явно оціненою та контрольованою похибкою.

Результати та обговорення. Апробація розробленої методики була проведена на автомобільній дорозі загального користування М-07 Київ — Ковель на ділянці від км. 84 до км. 117 при обстеженні стану цементобетонного покриття влаштованого більше 12 років тонкошаровим покриттям типу Slurry Seal. Загальна площа обстеженого покриття склала 25430 м². Модель YOLOv8-seg продемонструвала високу ефективність роботи. Загальне значення метрики mAP50-seg на тестовій вибірці склало 0,87, що свідчить про надійне розпізнавання та сегментацію об'єктів. Важливо відзначити диференційовану точність: класи «справне покриття» та «шви» були ідентифіковані з точністю понад 0,95, що пояснюється їхньою візуальною чіткістю. Для класів дефектів точність була дещо нижчою (0,83-0,84), що пов'язано з їхньою семантичною та візуальною неоднорідністю, особливо в умовах слабкої контрастності. Для інженерних розрахунків критичною є точність визначення площі. Порівняльний аналіз автоматично виміряних площ із результатами ручної обробки показав середню відносну похибку на рівні 4,7 %, що цілком прийнятно для потреб технічної інвентаризації та кошторисного планування.

Кількісний аналіз стану покриття на основі результатів автоматизованої обробки виявив незадовільну ситуацію. Лише 58,2 % від загальної площі було класифіковано як справне покриття. Частково зруйновані ділянки становили 32,6 %, а повністю зруйновані (вибоїни, скупчення тріщин) – 9,2%. Ці цифри об'єктивно обґрунтовують необхідність проведення ремонтних робіт на даній ділянці та дозволяють розрахувати попередні обсяги необхідних матеріалів.

Найбільшу практичну цінність має не загальна статистика, а просторовий аналіз отриманої карти дефектів. Візуальна інспекція мапи (рис. 5), побудованої на основі векторного шару, відразу ж виявляє неоднорідність розподілу дефектів. Для кількісної оцінки цього розподілу та виявлення закономірностей було застосовано метод оцінки ядерної щільності (Kernel Density Estimation – KDE). Аналіз KDE для класу «зруйноване покриття» виявив чіткі статистичні піки. Географічно ці піки з високою точністю збігалися з зонами динамічного навантаження на дорожнє полотно: ділянкою зупинки перед блок-постом (80-100 м), зонами з'їздів (200-240 м та 480-520 м) та ділянкою активного гальмування перед перехрестям (1120-1140 м).

Розподіл менш критичних дефектів класу 1 («частково зруйноване») виявився більш рівномірним, що може свідчити про вплив не тільки навантаження, але й загальних факторів старіння матеріалу, впливу клімату та можливих технологічних неоднорідностей при укладанні покриття. Проте невелике зростання їх щільності також спостерігалось поблизу зон концентрації класу 2, що може вказувати на прогресуючий характер пошкоджень.

Динаміка стану покриття вздовж траси детально відображена на профільній діаграмі (рис. 6), побудованій з кроком 10 метрів. Вона наочно демонструє, як відсоток справної площі різко падає в зонах, ідентифікованих за допомогою KDE, водночас зростаючи на інших ділянках. Така деталізація дозволяє локалізувати проблемні зони з точністю до декількох десятків метрів, що є ключовим для планування не капітального ремонту всієї ділянки, а цільових локальних втручань.

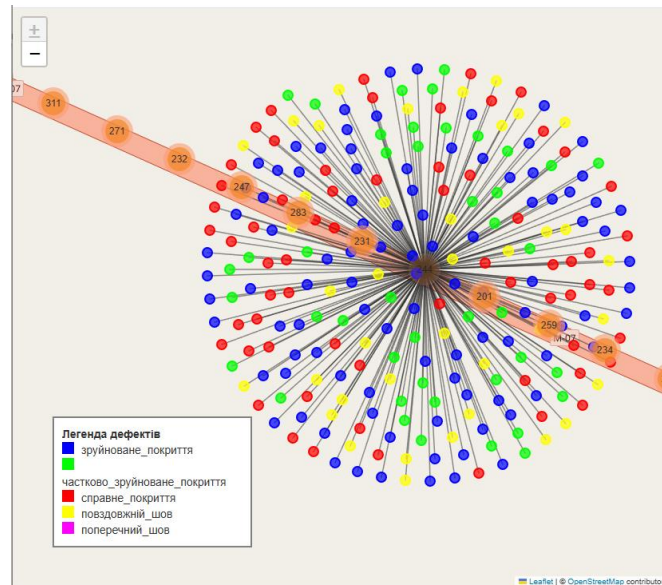


Рисунок 5 – Деталізація розподілу дефектів в конкретній точці ділянки
Figure 5 – Detailing the type of defects in a specific point of the plot

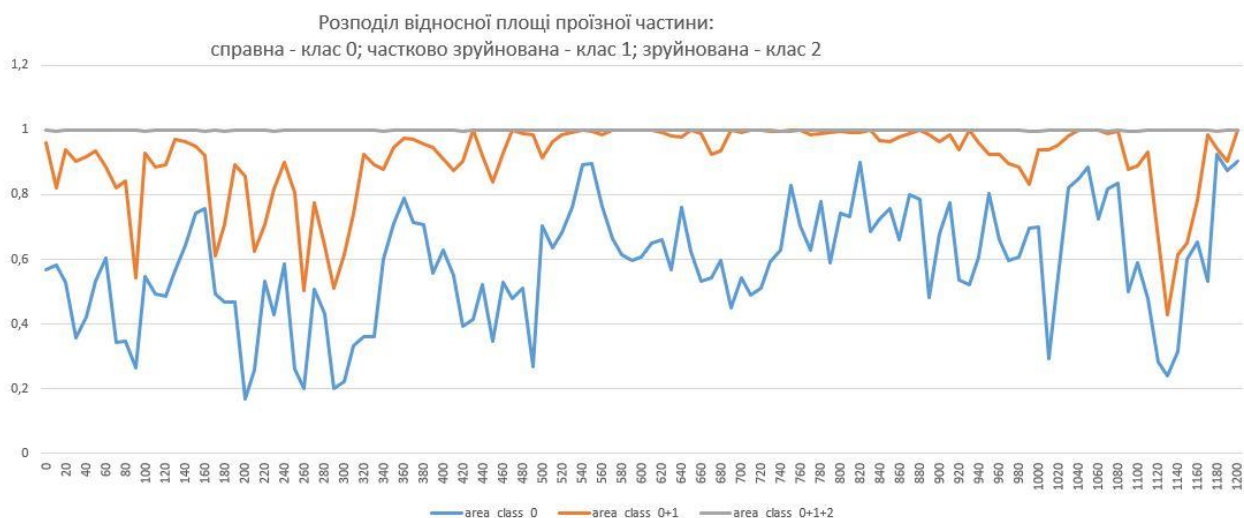


Рисунок 6 – Діаграми співвідношення площ тонкошарового покриття для кроку побудови (усереднення щільності розташування дефектів) — 10 м:

 — у справному стані;  — сумарно у справному стані та частково зруйноване

Figure 6 – Diagrams of the area of the thin-ball coating for the surface of the surface (average thickness of defect removal) – 10 m:

 – at the inquiry station;  – summarily at the reference station and partly destroyed

З практичної точки зору, розроблена методика забезпечує радикальне підвищення ефективності робіт з моніторингу. Обстеження ділянки в 1,2 км займає хвилини, а не години, а обробка даних відбувається автоматично. Отримані цифрові дані дозволяють точно розрахувати обсяги матеріалів для ямкового або картного ремонту, оцінити необхідну кількість герметиків для тріщин, а також обґрунтувати обмежувальні заходи (наприклад, тимчасове обмеження швидкості до 60 км/год) на найбільш аварійних ділянках до виконання ремонту.

Висновки. Розроблено комплексну методику автоматизованого візуального обстеження цементобетонних покриттів з шаром зношування. Методика базується на нейромережевій моделі YOLOv8-seg та охоплює повний технологічний ланцюжок від мобільної відеозйомки з геоприв'язкою до генерації цифрових векторних карт дефектів, готових до використання в геоінформаційних системах.

Апробація методики на реальній ділянці на автомобільній дорозі загального користування М-07 Київ — Ковель від км. 84 до км. 117 при обстеженні стану цементобетонного покриття влаштованого більше 12 років тонкошаровим покритвом типу Slurry Seal підтвердила її технічну ефективність. Модель забезпечує середню точність сегментації (mAP50-seg) на рівні 0,87, а похибка визначення площі дефектів становить близько 4,7 %, що задовольняє вимогам інженерної діагностики. Кількісна оцінка показала, що лише 58,2 % площі покриття перебуває у справному стані, що є об'єктивним підґрунтям для планування ремонту.

Застосування методів просторового аналізу (оцінка ядерної щільності) до результатів роботи методики дозволило вийти за рамки простої інвентаризації та встановити статистично значущий зв'язок між розташуванням критичних руйнувань та зонами докладання динамічних навантажень ($R^2=0,78$). Це свідчить про навантажено-індукований характер більшості дефектів і вказує на деформації цементобетонної основи як на їх ймовірну першопричину.

Методика формує надійну інформаційну основу для переходу від традиційного, реактивного підходу до управління станом дорожньої інфраструктури до предиктивного. Створюючи точний, геоприв'язаний цифровий слід стану покриття з встановленими причинно-наслідковими зв'язками, вона відкриває можливості для прогнозування розвитку дефектів, оптимального планування термінів та обсягів ремонтних робіт, що веде до суттєвого підвищення економічної ефективності утримання доріг та подовження їх ресурсу.

Перелік посилань

1. Zhang, L., Yang, F., Zhang, Y., & Zhu, Y. J. Road crack detection using deep convolutional neural network. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2016. DOI: 10.1109/ICIP.2016.7533059.
2. Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiyama, T., & Omata, H. Road Damage Detection and Classification Using Deep Neural Networks with Smartphone Images. *arXiv preprint arXiv:1801.09454*, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1801.09454.
3. Jiang, Y., & Pang, D. A real-time road crack detection method based on YOLOv8. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023. DOI: 10.1088/1742-6596/2441/1/012002.
4. Jocher, G., et al. Ultralytics YOLOv8. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.ultralytics.com>.
5. Arya, D., Maeda, H., Ghosh, S. K., et al. Global Road Damage Detection: State-of-the-Art Solutions. *IEEE International Conference on Big Data*, 2020. DOI: 10.1109/BigData50022.2020.9377796.
6. Radopoulou, S. C., & Brilakis, I. A review of pavement defect detection and classification systems. *Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction*, 2016. DOI: 10.1680/icsic.64638.067.
7. Koch, C., & Brilakis, I. Pothole detection in asphalt pavement images. *Advanced Engineering Informatics*, 2011. Vol. 25, No. 3. P. 507–515. DOI: 10.1016/j.aei.2011.01.002.
8. Huidrom, L., Das, L. K., & Sud, S. K. Method for Automated Assessment of Cracking in Asphalt Pavement Surfaces. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2013. No. 2367. P. 3–13. DOI: 10.3141/2367-01.
9. Eisenbach, M., et al. How to Get Pavement Distress Detection Ready for Deep Learning? A Systematic Approach. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2017. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966020.
10. Dorafshan, S., Thomas, R. J., & Maguire, M. Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete. *Automation in Construction*, 2018. Vol. 94. P. 154–166. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.06.006.

11. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision (2nd ed.). — Cambridge: Cambridge University Press, 2003. — 673 p. <https://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/hzbook>.
12. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. — Springer, 2022 — 1232 p. <https://szeliski.org/Book>.
13. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol.: 22, Is.: 11, Nov. 2000, p. 1330 – 1334. DOI: 10.1109/34.888718.
14. https://docs.opencv.org/4.x/da/d6e/tutorial_py_geometric_transformations.html
15. Renso, C., Spaccapietra, S., & Zimányi, E. (Eds.). (2013). Mobility Data: Modeling, Management, and Understanding. Cambridge University Press. 424 p. ISBN 978-1107028192.
16. Quddus, M. A., Ochieng, W. Y., & Noland, R. B. (2007). Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15(5), 312–328. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.05.002>.
17. O'Rourke, J. Computational Geometry in C. 2nd edition. Cambridge University Press, 1998. — 358 p.
18. Goldberg, D. (1991). What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic. *ACM Computing Surveys*, 23(1), 5–48. <https://doi.org/10.1145/103162.103163>.

COMPREHENSIVE METHODOLOGY OF AUTOMATED VISUAL INSPECTION OF CEMENT CONCRETE ROAD PAVEMENT WITH WEAR LAYER BASED ON THE YOLOV8-SEG NEURAL NETWORK FOR PREDICTIVE DIAGNOSTICS AND INFRASTRUCTURE MANAGEMENT SYSTEMS

Oksen Dmytro Y., Master, Tutorpeers LLC, Kyiv, Ukraine, e-mail: dmytro.oksen@tutorpeers.com, tel.: +380506744778, <https://orcid.org/0009-0005-8280-4604>.

Oksen Yevgeny I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor Department of System Design of Transport Infrastructure Objects and Geodesy, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: eioksen@gmail.com, tel.: +380506744778, <https://orcid.org/0000-0003-1075-6840>.

Summary. Mo Research in the robot is aimed at identifying spatial segmentation, classification and geoinformation analysis of defects in cement concrete coatings with a wear ball. The technique is intended to serve as the basis for the formation of a digital model that will become a tool for predictive diagnostics. The core of the method contains the YOLOv8-seg neural network, optimized for instance segmentation tasks in real time. A new technological package has been developed, which includes: 1) mobile recording with synchronous GNSS binding; 2) forming a specialized dataset with five classes, adapted to the characteristics of the combined coating; 3) active modeling on marked polygonal masks; 4) post-processing and combining masks from different frames; 5) generation of vector balls of defects in GeoJSON format and their integration into GIS; 6) automatic breakdown of key indicators of the technical state (implosion index, number of defects). The testing was carried out on the plots of the highway M-07 Kiev – Kovel. The system provided pixel segmentation of defects with an average accuracy (mAP50-seg) of 0.87 on the test sample. A quick analysis revealed that more than 58.2 % of the surface area is found in the reference station, while partially constructed plots become 32.6 %, and completely constructed plots – 9.2 %. A deep spatial analysis revealed a statistically significant correlation between zones of concentration of defects of the “designed surface” type and points of dynamic stress (knuckles, joints, plating areas). This made it possible to classify 92 % of all significant ruins as «false lands». The developed methodology has brought the possibility of complete automation to the process of extracting objective, metrologically valid data about the coating mill. The results of the investigation can only be used to clearly describe the country, and also, through extensive analysis, indicate the reasons for it. This allows you to move from routine repairs to complete, technologically advanced repairs. The system forms a digital trace of the object, which is a critically important first step until the creation of a predictive digital model. Further research will focus on the integration of visual inspection data with the results of non-contact flaw detection methods (for example, ground penetrating radar probing) for assessing not only the surface, but also the internal balls of the structure.

Keywords: automated quilting, cement concrete coating, wear ball, neural measurement, YOLOv8-seg, instance segmentation, geographic information system, predictive control, digital twin, spatial analysis, deposited defect.

References

1. Zhang, L., Yang, F., Zhang, Y., & Zhu, Y. J. Road crack detection using deep convolutional neural network. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2016. DOI: 10.1109/ICIP.2016.7533059.
2. Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiyama, T., & Omata, H. Road Damage Detection and Classification Using Deep Neural Networks with Smartphone Images. *arXiv preprint arXiv:1801.09454*, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1801.09454.
3. Jiang, Y., & Pang, D. A real-time road crack detection method based on YOLOv8. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023. DOI: 10.1088/1742-6596/2441/1/012002.
4. Jocher, G., et al. Ultralytics YOLOv8. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.ultralytics.com>.
5. Arya, D., Maeda, H., Ghosh, S. K., et al. Global Road Damage Detection: State-of-the-Art Solutions. *IEEE International Conference on Big Data*, 2020. DOI: 10.1109/BigData50022.2020.9377796.
6. Radopoulou, S. C., & Brilakis, I. A review of pavement defect detection and classification systems. *Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction*, 2016. DOI: 10.1680/icsic.64638.067.
7. Koch, C., & Brilakis, I. Pothole detection in asphalt pavement images. *Advanced Engineering Informatics*, 2011. Vol. 25, No. 3. P. 507–515. DOI: 10.1016/j.aei.2011.01.002.
8. Huidrom, L., Das, L. K., & Sud, S. K. Method for Automated Assessment of Cracking in Asphalt Pavement Surfaces. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2013. No. 2367. P. 3–13. DOI: 10.3141/2367-01.
9. Eisenbach, M., et al. How to Get Pavement Distress Detection Ready for Deep Learning? A Systematic Approach. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2017. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966020.
10. Dorafshan, S., Thomas, R. J., & Maguire, M. Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete. *Automation in Construction*, 2018. Vol. 94. P. 154–166. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.06.006.
11. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision (2nd ed.). — Cambridge: Cambridge University Press, 2003. — 673 p. <https://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/hzbook>.
12. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. — Springer, 2022 — 1232 p. <https://szeliski.org/Book>.
13. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol.: 22, Is.: 11, Nov. 2000, p. 1330 – 1334. DOI: 10.1109/34.888718.
14. https://docs.opencv.org/4.x/da/d6e/tutorial_py_geometric_transformations.html
15. Renso, C., Spaccapietra, S., & Zimányi, E. (Eds.). (2013). Mobility Data: Modeling, Management, and Understanding. *Cambridge University Press*. 424 p. ISBN 978-1107028192.
16. Quddus, M. A., Ochieng, W. Y., & Noland, R. B. (2007). Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15(5), 312–328. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.05.002>.
17. O'Rourke, J. Computational Geometry in C. 2nd edition. *Cambridge University Press*, 1998. — 358 p.
18. Goldberg, D. (1991). What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic. *ACM Computing Surveys*, 23(1), 5–48. <https://doi.org/10.1145/103162.103163>.

Дата надходження до редакції 08.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 05.02.2026.

**МЕТОДИКА ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ НАСИПІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ
НАПРУЖЕНОГО СТАНУ**

**METHODOLOGY FOR ASSESSING THE STABILITY OF EMBANKS TAKING INTO
ACCOUNT THEIR STRESSED STATE**



Петрови́ч Володи́мир Володи́мирович, аспірант кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: [e-mail: menor@ukr.net](mailto:menor@ukr.net), тел. +380930932262

<https://orcid.org/0009-0002-1513-2789>



Петрови́ч Ігор Володи́мирович, аспірант кафедри системного проектування 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 статті розглянуто питання оцінювання стійкості дорожніх насипів з урахуванням їх напружено-деформованого стану. На основі теорії міцності Мора–Кулона та результатів чисельного моделювання запропоновано критерій відносної міцності ґрунтів земляного полотна. Виконано аналіз напруженого стану еталонного насипу та визначено характер розподілу небезпечних зон у його поперечному перерізі. Показано можливість використання запропонованого показника для порівняльної оцінки стійкості насипів різної геометрії та виявлення потенційних поверхонь ковзання.

Ключові слова: дорожній насип, стійкість укосів, напружено-деформований стан, теорія Мора–Кулона, міцність ґрунтів, показник відносної міцності, поверхні ковзання, метод скінченних елементів

Вступ. На шляху до вироблення методики оцінки стійкості насипу з урахуванням її напруженого стану стояла низка взаємопов'язаних завдань, головними з яких є:

1. вибір певної теорії міцності, що узгоджується з основним положенням пропонованого підходу до дослідження стійкості ґрунтів насипу та залежності їх міцності від напруженого стану;
2. задання передумов з метою конкретизації цієї залежності;
3. обґрунтування критерію міцності, що задовільно описує близькість напруженого стану ґрунту земляного полотна до граничного (в умовах обмеженості вихідних даних).

Перше із зазначених завдань було вирішено вибором як вихідної узагальненої теорії міцності — теорії Мора, яка нині є однією з найбільш фізично обґрунтованих серед численних відомих теорій міцності. Вагомим аргументом на користь такого вибору є також той факт, що при розрахунку напруженого стану насипу методом скінченних елементів (МСЕ) розв'язувалася плоска задача, в якій не враховувалося (умовно приймалося сталим) напруження, що діє нормально до поперечного перерізу насипу, тобто збігається з одним із головних напружень, яке, згідно з теорією Мора, не впливає на міцність.

Основні аспекти теорії Мора–Кулона у застосуванні до залежності міцнісних характеристик ґрунтів від їх напруженого стану. Ґрунт у загальному випадку являє собою сукупність структурних елементів. Навіть у найпростішому випадку, коли розглядається робота зв'язків, що виникають у контакті між двома ізольованими структурними елементами, характер їх роботи та опір руйнуванню залежать від виду напружено-деформованого стану. Це зумовлено тим, що в реальних умовах навантаження, як правило, прикладається під деяким кутом до лінії зв'язку, унаслідок чого лише частина зусилля безпосередньо бере участь у її руйнуванні, тоді як інша частина може спричинити виникнення додаткових сил опору (наприклад, у вузлах тертя).

У випадку контакту між двома структурними елементами необхідно також враховувати, що в міру розвитку напруженого стану, який супроводжується пружними деформаціями, у роботу може включатися більша або менша кількість зв'язків, що зумовлює зміну їх сумарної міцності.

Для сукупності структурних елементів характерною є різна орієнтація зв'язків відносно рівнодіючої зовнішнього навантаження. Унаслідок цього окремі елементи перебувають у різних умовах напруження та деформації, що обумовлює функціональну залежність міцності ґрунту від напруженого стану.

Таким чином, при переході від аналізу опору взаємному зміщенню окремих структурних елементів до розгляду опору зовнішньому навантаженню масиву ґрунту в цілому виявляється залежність його міцності від умов напружено-деформованого стану, в якому він перебуває в процесі навантаження. Іншими словами, міцність ґрунту в загальному випадку є функцією його напруженого стану. Сучасні підходи до адаптивного управління транспортними потоками дозволяють зменшити пікові та імпульсні навантаження від руху транспорту, що позитивно впливає на напружено-деформований стан та довготривалу стійкість автодорожніх насипів [1].

Звідси постає проблема оцінювання міцності ґрунту в будь-якому можливому напруженому стані на основі експериментальних даних, отриманих для обмеженої кількості напружених станів. Розв'язання цієї задачі здійснюється із застосуванням відповідної теорії міцності, якою в даній роботі прийнято теорію Мора.

При використанні цієї теорії ґрунт розглядається не як дискретне тіло, яким він фактично є, а як суцільне середовище, у межах якого зусилля трактуються як середні напруження, віднесені до одиниці площі перерізу ґрунтового масиву. Такий підхід не суперечить основним принципам макрореології, оскільки розміри структурних елементів ґрунту є значно меншими порівняно з розмірами інженерних споруд та їх конструктивних елементів.

Сутність цієї теорії в сучасному її викладі в найбільш загальному вигляді можна виразити так:

1) руйнування матеріалу відбуватися в результаті досягнення граничного значення різниці між більшою і меншою головною напругою (тобто граничного значення девіатора напруг);

2) граничне значення девіатора напруг залежить від значення та знака меншої головної напруги.

Під міцністю матеріалу розуміється його здатність витримувати без руйнування певний напружений стан. Граничне значення цього напруженого стану, виражене чисельно, визначає міцність матеріалу.

У відповідності з теорією міцності Мора міцність матеріалу можна охарактеризувати різними способами, тобто різними граничними кривими. Узагальненими характеристиками міцності є параметри граничних кривих, які виявляються різними залежно від того, яку криву ми будуємо. І якщо не прийняти будь-якої передумови щодо механізму руйнування, ці параметри будуть мати свого роду формальний характер.

Морем запропоновано як граничну криву приймати обгинальну кругів. У цьому випадку досягнення межі міцності характеризується досягненням певного (граничного) значення дотичної напруги на деякому майданчику, орієнтування якої по відношенню до головних напрямків визначається положенням точки дотику на колі. Однак досягнення на заданому майданчику ще не означає, що руйнація відбудеться саме на цьому майданчику. Якщо ж покласти, що руйнація відбувається за цими майданчиками, це означає розглядати будь-яке руйнування як наслідок зсуву по деяким майданчикам із найбільш не вигідним співвідношенням нормальних і дотичних напруг.

Такий підхід, будучи певною мірою формальним (у тому сенсі, що ми відволікаємося від дійсного механізму руйнування матеріалу), дає і низку практичних переваг, зводячи складне явище до найпростішої схеми, розглянутої по суті Кулоном, і вносячи певний фізичний зміст в параметри граничної лінії.

Таким чином, приймаючи як вихідну узагальнену теорію міцності теорію Мора і допускаючи потім, що руйнування відбувається внаслідок впливу дотичних напруг на деяких майданчиках ми переходимо до відомої теорії Мора-Кулона.

Відповідно до цієї теорії параметри огинаючої кіл Мора є характеристиками опору ґрунту зсуву.

Ще Мором запропоновано замінити обгинальну кругів прямою, дотичних цих кіл. Численні експериментальні дані показують, що у обмеженому діапазоні нормальних напруг така заміна цілком можлива і доцільна, так як спрощує не тільки експериментальні визначення параметрів міцності, але і спрощує розрахунки на міцність.

У цьому випадку рівняння граничної лінії набуває вигляду:

$$\tau_{\text{гр.}} = c + f \cdot \sigma_n, \quad (1)$$

де, c – відрізок, отсекаемый спрямляющей лінією на осі ординат, величина, що називається зчепленням, яку умовно у фізичному сенсі вважатимуться міцністю ґрунту на зсув при нульових нормальних напругах;

f – кутовий коефіцієнт спрямовуючої лінії..

Разом з тим у нашому випадку c і f не постійні, а змінюватимуться залежно від того, в якому діапазоні нормальних напруг ми спрямовуємо граничну обгинальну. Найбільшу крутизну вона має в зоні малих нормальних напруг. У зв'язку з цим значення параметра c , що визначається для діапазону малих навантажень, буде завжди менше того ж значення, що визначається для діапазону великих нормальних напруг.

Постає питання: як цю закономірність конкретизувати?

Спроби виділити групи елементів, для яких можуть бути побудовані граничні криві, що обгинають, не мали успіху. Не підтвердились результати проведених рядом дослідників експериментального визначення форми огинаючої, що привело до висновку, що вона має складне огертання, близьке до параболічного. Це пояснюється мабуть тим, що у експериментах величини менших основних напруг варіювалися як і позитивному, і негативному діапазоні, що відповідає умовам роботи досліджуваного насипу, у кожній точці якого головні напруги є ожимаючими.

Було також зіставлено виконану побудову кіл Мора з даними експериментальних досліджень механічних властивостей ґрунтів. При цьому було виявлено відповідність у формі кривих, що описують залежність між дотичними і нормальними напругами для різних рівнів напруженого стану для різних рівнів напруженого стояння на майданчиках, орієнтованих певним чином по відношенню до головних напрямків (рис.1). Цікаво, що криві дійсно мають близький до параболи контур, хоча аналогія з вищезгаданими результатами досліджень дуже умовна так як по-перше, вершина параболи знаходиться в області ожимаючих, а не нормальних напруг, що розтягують, а по-друге, крива не є по суті огинаючої кіл. Строго ж виконана побудова огинаючої та аналіз отриманої кривої не свідчить про правомірність вважати цю криву граничною, хоча б з тієї причини, що чисельним розрахунком отримані більші значення дотичних напруг ніж значення $\tau_{гр.}$, що визначаються точками торкання цієї кривої до кіл напружень.

На жаль, встановлений факт аналогії залежностей дотичних і нормальних напруг, отриманих чисельним розрахунком і експериментально, не може бути безпосередньо використаний при вирішенні поставленої задачі, оскільки неясним залишається питання про орієнтацію майданчика граничного стану: автори пропонують визначати її в залежності від співвідношення між напругою напруги та придатності пластичних деформацій. досліджуваного ґрунту в приладі 3^хосного стиснення.

Однак, незважаючи на це, аналіз факту відповідності дозволяє зробити висновок: по-перше, про хорошу узгодженість даних розрахунку напруг МКЕ з експериментальними; і по-друге, про справедливість закону сухого тертя Кулона у відповідності граничної рівноваги ґрунту.

Але при всій значущості цих висновків питання про визначення граничного опору ґрунту зсуву залишається відкритим, оскільки нормальні напруги, відносяться до області, для якої огинаюча має прямолінійний обрис (що в свою чергу тягне за собою сталість параметрів зчеплення і кута внутрішнього тертя) діють лише в дуже невеликій частині найбільш завантажених силами власної ваги елементів насипу, причому найбільш віддалених від привідкосної області, яка нас цікавить.

Необхідно було прийняти якусь передумову щодо характеру залежності однієї з характеристик міцності (φ або c) від напруженого стану, і тоді друга могла бути отримана за допомогою застосування рівнянь граничної рівноваги.

Найбільш зручним виявилось характеризувати напружений стан ставленням між головною напругою (більшою і меншою). Більше того, зіставлення картини розподілу ізоліній σ_1/σ_2 і ізоліній дотичних напруг, отриманих чисельним розрахунком, і аналіз аналогії, що спостерігається, хоча і не дає підстав говорити про яскраво виражену залежність цих 2^хфакторів, але свідчить про їх істотний взаємозв'язок.

Таким чином, якби йшлося про сипкий ґрунт, то логічно було б використати відому залежність теорії міцності Мора.

$$\sin \varphi_{\text{сип.}} = \frac{\sigma_1/\sigma_2 - 1}{\sigma_1/\sigma_2 + 1}. \quad (2)$$

Але оскільки досліджувана насип, як передбачалося, складена зв'язними ґрунтами, то логічно очевидно, що наявність зчеплення збільшить нормальну напругу до майданчика за рахунок появи сил зв'язності, і тим самим зменшить кут внутрішнього тертя ґрунту. У розрахунку ця зміна була відображена виданням понижувального коефіцієнта.

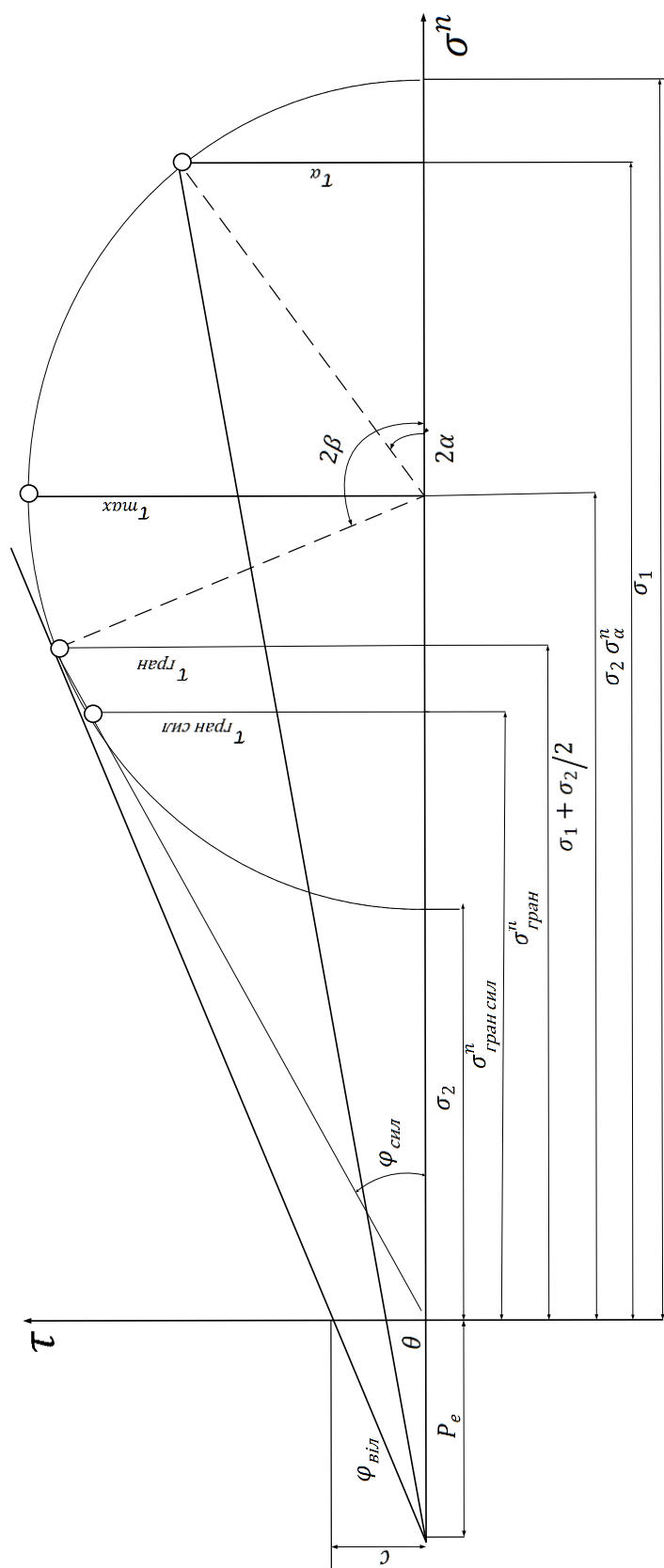


Рисунок 1 – Коло граничних напруг Кулона-Мора (до розрахунку параметрів зсувостійкості та обґрунтування критерію міцності)

Figure 1 – Mohr-Coulomb limit stress circle (for calculating shear resistance parameters and substantiating the strength criterion)

При аналізі різних варіантів його розрахунку головним критерієм було збільшення параметра зчеплення зі збільшенням більшої головної напруги (у відповідності з експериментальними даними викладеними). Значення параметра c приймалося рівним 0,015 МПа для прямолінійної ділянки граничної кривої, що також відповідає результатам досліджень механічних властивостей суглинистого ґрунту.

Для задоволення цим вимогам найбільш доцільно виявити понижуючий коефіцієнт постійним в межах кожного вертикального стовпа і визначати його як відношення синусів кутів внутрішнього тертя, отриманих відповідно при $c = 0$ ($\sin \varphi_{\text{сип.}}$) і $c = 0,015$ МПа для елементів, граничний стан яких описується прямолінійною ділянкою. Для вертикальних стовпів з відсутністю таких елементів коефіцієнт приймався шляхом порівняльного аналізу.

У розрахунках параметри φ і c були пов'язані відомою умовою граничної рівноваги для зв'язкових ґрунтів:

$$\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} - \operatorname{tg} \varphi \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = c. \quad (3)$$

Незважаючи на те, що широко прийнятий на практиці в розрахунках стійкості укосів методом граничної рівноваги часто піддається критиці через спрощеність пропозицій і неоднозначності рішень, ми все ж таки вважали за можливе використовувати тут і дали можливим використовувати тут і далі його залежності. Підставою для цього послужило і наявність інших думок і навіть цілих досліджень, які б показували переваги цього методу. Зокрема викладеної в [2] порівняльний аналіз методів граничного стану, кінцевих елементів і граничної рівноваги, дозволимо авторам зробити висновок про те, що останній має достатню точність, а обмеження, пов'язані із застосуванням методу граничного стану напруг і МСЕ підтверджують повну придатність методу граничної рівноваги для розрахунків стійкості.

Обґрунтування критерію міцності ґрунтів земляного полотна. Серед безлічі існуючих пропозицій щодо визначення коефіцієнта запасу міцності ґрунту більша частина у своїй основі використовує уявлення про неперед заданої форми поверхні обвалення. В даний час широко застосовуються в розрахунку стійкості укосів метод круглоциліндричних поверхонь ковзання, який значно спрощує реальний процес руйнування укосу. Недоліки цього визначення коефіцієнта запасу (називаємо його далі K_3) докладно викладені [3].

Інше визначення K_3 як ставлення значень показників міцності, у яких відбувається руйнація до їх фактичному нормативному значенню також дуже недосконало, т.к. зберігаються недоліки, притаманні методам із заздалегідь заданою поверхнею обвалення і не розглядається взаємозв'язок із напружено-деформованим станом насипу в цілому.

Ряд авторів [3] для виділення в тілі ґрунтового масиву зон з граничним напруженим станом було запропоновано використання коефіцієнта, що визначає ступінь використання максимального опору ґрунту, у вигляді співвідношення різниці головної напруги до їх максимального значення, так званої "пропорції перенапруги":

$$K_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}}, \quad (4)$$

де $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ визначається виходячи з рівнянь граничного стану з теорії Кулона-Мора:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2c \cos \varphi \quad (5)$$

Припускаючи залежність характеристик міцності ґрунту від його напруженого стану, викладену методику неможливо використовувати без детальних даних про цю залежність.

Велику перспективність розрахунку коефіцієнта запасу стійкості як відношення руйнівного навантаження до розрахункового відзначали ще В.А. Флорін та П.А. Нечипорович. Ця ідея відповідає принципу, що зарекомендував себе в розрахунках конструкцій та споруд з руйнівних навантажень. Метод не набув поширення на практиці розрахунків стійкості у зв'язку з необхідністю використання спрощених розрахункових схем, які допускають проведення розрахунків при руйнівних навантаженнях. Однак розробка чисельних методів розрахунку дозволяє проаналізувати на основі єдиної розрахункової моделі розвитку напружено-деформованого стану насипів при різних інтенсивності навантажень і, у тому числі, при практично граничних їх значеннях без будь-яких припущень, що спрощують, що призводять до зниження достовірності результатів розрахунку.

При реалізації цієї методики визначення K_3 явно слід було б, зафіксувавши значення деформованих характеристик у вузлах сітки розбиття, робити ступінчасте навантаження насипу. Ітераційний процес розрахунку зміни напружено-деформованого стану при кожному збільшенні навантаження буде продовжуватися аж до досягнення навантаження руйнівного значення. Але це порівняно досконалий шлях передбачає наявність лабораторних даних за механічними властивостями ґрунту, необхідних для коригування значень деформаційних характеристик у вузлах сітки після застосування кожного ступеня навантаження і тому не міг бути використаний.

Відоме становище теорії Мора у тому, що руйнація матеріалу відбувається у результаті досягнення граничного значення різниці між головними напругами, тобто по досягненні дотичними напругами свого максимуму на деяких майданчиках, певним чином орієнтованих по відношенню до головних напрямків послужило обґрунтуванням для прийняття коефіцієнта запасу міцності у вигляді відношення максимального значення дотичної напруги для цього напруженого стану кінцевого елемента до діючого. Причому як останній було прийнято дотичну напругу по горизонтальному майданчику τ_{zx} :

$$K_3 = \frac{\tau_{max}}{\tau_{zx}}. \quad (6)$$

$$\tau_{zx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}. \quad (7)$$

Розрахунки K_3 виконані для 3^x насипів з різною крутістю укосу показали, що незалежно від геометрії поперечного перерізу практично у всіх точках відкосової зони максимальні дотичні напруги діють по горизонтальних майданчиках або дуже близьких до них (як для верхніх і нижніх бровок насипу) і відповідно $K_3 = 1$ точно або приблизно.

Таким чином використання коефіцієнта не забезпечує ефективність порівняльної оцінки стійкості елементів земляного полотна.

У відповідності з умовою руйнування, прийнятою в теорії Мора-Кулона (досягнення деякого майданчика граничного, найбільш невідповідного значення дотичної напруги) логічно було б на перший погляд прийняти коефіцієнт запасу як співвідношення між граничними і фактичними значеннями напруг. Важливим тут є питання орієнтації майданчиків, якими враховується цей фактичний напружений стан. Логічно, це мають бути майданчики з максимальним рівнем напруженого стану, тобто, майданчики дії максимальної дотичної напруги. Розрахунок $K_3 = \frac{\tau_{грн}}{\tau_{max}}$, було виконано (рис.2).

Однак звертає на себе увагу той факт, що величина τ_{max} у співвідношенні K_3 є похідною від величин, безпосередньо отриманих чисельним розрахунком і, отже, може бути піддана неточностям формульного розрахунку. Переважно було б фігурування у формулі вихідних величин. Тому було прийнято рішення використовувати для визначення K_3 величину дотичних напруг, що діють горизонтальними майданчиками, і таким чином розглядати досягнення граничного стану ґрунтового масиву горизонтальними майданчиками. Правомірність цього припущення підтверджується і таким, що, як було показано раніше, у привідкосній зоні насипу максимальні дотичні напруги діють горизонтальними майданчиками або близькими до них.

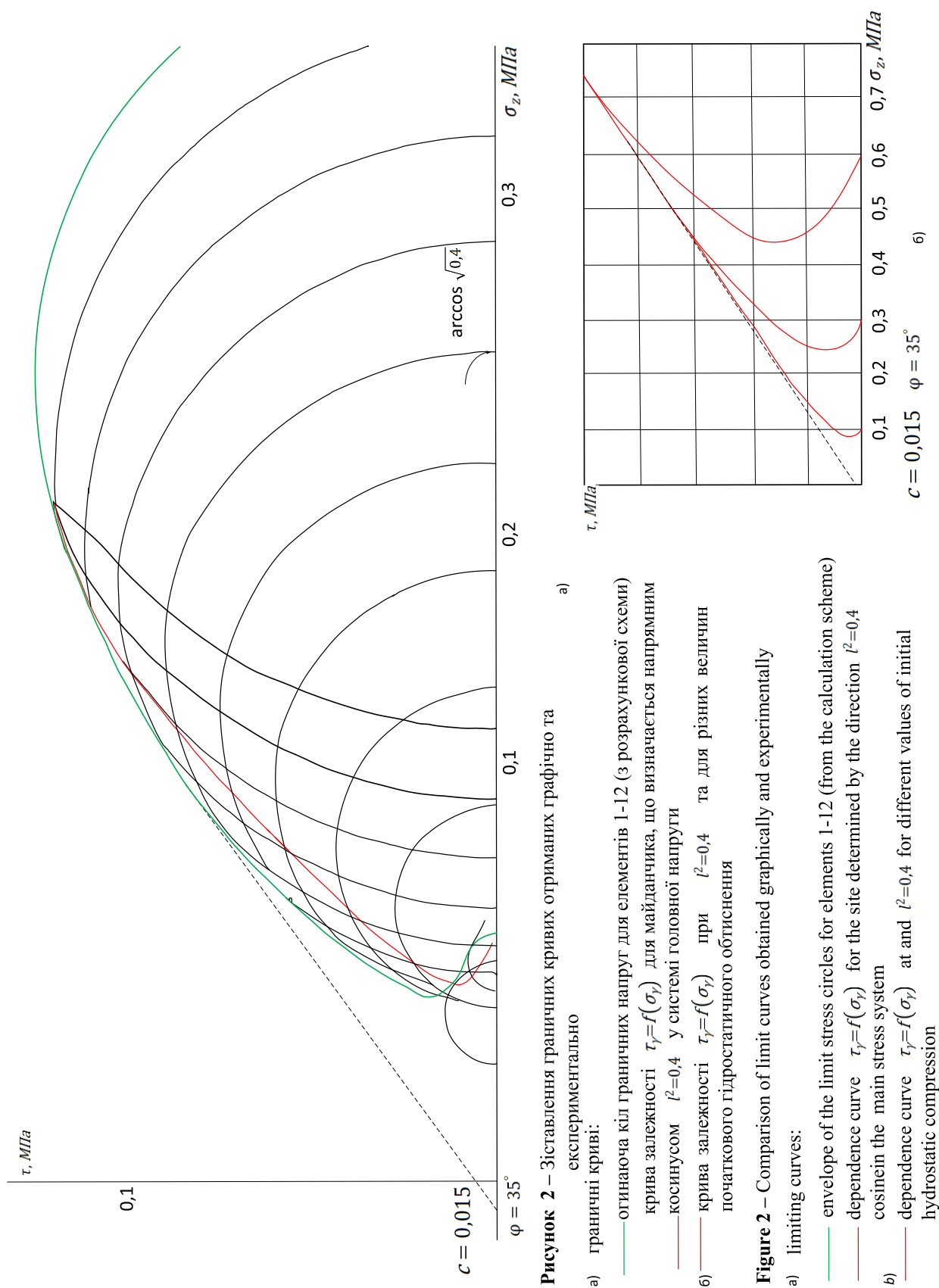


Figure 2 – Comparison of limit curves obtained graphically and experimentally

a) limiting curves:

- envelope of the limit stress circles for elements 1-12 (from the calculation scheme)
- dependence curve $\tau_r = f(\sigma_r)$ for the site determined by the direction $l^2 = 0,4$ cosine in the main stress system
- dependence curve $\tau_r = f(\sigma_r)$ at and $l^2 = 0,4$ for different values of initial hydrostatic compression

З іншого боку, в кожній точці з певним напруженим станом існує два майданчики, однаково нахилені до майданчика τ_{max} , по яких діють рівні по абсолютній величині напруги $\tau_{грн}$, але тільки на одній з них має найбільше, тобто, найменш вигідне співвідношення між дотичними та нормальними до цього майданчика напругою. Саме це співвідношення, а не абсолютна величина відповідної йому дотичної напруги найкраще відобразить напружений стан у точці ґрунтового масиву. Вираз для K_3 набуває вигляду:

$$K_3 = \frac{\tau_{грн}}{\frac{\sigma_{грн}^n}{\tau_{zx}^n}}, \quad (8)$$

де $\sigma_{грн}^n$ і σ_{zx}^n - напруги, що діють нормально до граничного та горизонтального майданчиків відповідно.

Враховуючи зв'язність ґрунту, в обох випадках при математичному розгляді питання до нормальних ми відносимо і сили зв'язності, які сумарно оцінюються так званим тиском зв'язності, на колі Мора представленим відрізком $\beta_e = c/tg\varphi = c \cdot ctg\varphi$.

Використовуючи геометричні закономірності круга Мора, надаємо (8) вид;

$$K_3 = \frac{\frac{\tau_{грн}}{\sigma_{грн}^n}}{c \cdot ctg\varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 - \tau^2}}. \quad (9)$$

звідки, враховуючи, що співвідношення $\frac{\tau_{грн}}{\sigma_{грн}^n}$ є тангесом так званого кута внутрішнього тертя, а величина c , що називається зчепленням, виражається математично як

$$c = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \frac{1}{\cos\varphi} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} tg\varphi. \quad (10)$$

отримуємо

$$K_3 = \frac{tg\varphi \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2 \sin\varphi} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 - \tau^2} \right)}{\tau_{zx}} \quad (11)$$

або

$$K_3 = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2 \cos\varphi} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 - \tau^2}}{\tau} \cdot tg\varphi \quad (12)$$

Однією з головних вимог до критерію міцності був правильний облік виду напруженого стану точки ґрунтового масиву: найбільш не вигідне співвідношення між головними напрямками мало виразитися у зменшенні коефіцієнта запасу міцності. Виконані розрахунки K_3 для чотирьох розрахункових схем високого насипу різної геометрії дозволили зробити висновок про невідповідність критерію (12) на цю вимогу.

Ряд побудов кіл Мору для елементів з різним рівнем напруженого стану який зручніше за все висловити через співвідношення головних напруг σ_1/σ_2 дозволив виявити джерело помилки: кожній групі точок з однаковим кутом між майданчиками τ_{zx} і $\tau_{грн}$ (відповідного максимальному σ^T) найбільший K_3 визначальний, має точка з найбільшим співвідношенням σ_1/σ_2 , що призводить до своєрідного збільшення масштабу і в свою чергу спричиняє збільшення співвідношення $tg\varphi/tg\theta$, де $tg\theta = \frac{\tau_{zx}}{\sigma_{zx}^n}$

Необхідність введення виправлення на напружений стан впливає з аналізу виразу (12).

Дійсно, у відповідності зі зробленою пропозицією про конкретизацію залежності сдвигових параметрів від напруженого стану ґрунту, функції кута φ визначається як

$$\begin{aligned}\sin \varphi &= k \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}, \\ \cos \varphi &= \frac{\sqrt{(1-k^2)\sigma_1^2 + (1-k^2)2\sigma_1\sigma_2 + (1-k^2)\sigma_2^2}}{\sigma_1 + \sigma_2}, \\ \operatorname{tg} \varphi &= \frac{k(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sqrt{(1-k^2)\sigma_1^2 + (1+k^2)2\sigma_1\sigma_2 + (1-k^2)\sigma_2^2}},\end{aligned}\quad (13)$$

де k - деякий числовий коефіцієнт

Тоді

$$K_3 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 + \sigma_2) + k(\sigma_1 - \sigma_2)\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - 4\tau^2}}{2\tau\sqrt{(1-k^2)\sigma_1^2 + (1+k^2)2\sigma_1\sigma_2 + (1-k^2)\sigma_2^2}} \quad (14)$$

Після поділу на σ_2^2

$$K_3 = \frac{\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^2 + k\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} - 1\right)\sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} - 1\right)^2 - \left(\frac{2\tau}{\sigma_2}\right)^2}}{\frac{2\tau}{\sigma_2}\sqrt{(1-k^2)\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^2 + 2(1-k^2)\frac{\sigma_1}{\sigma_2} + (1-k^2)}} \quad (15)$$

Не претендуючи на роль суворого математичного доказу, вираз (15) все ж таки свідчить про те, що щодо σ_1/σ_2 ступінь чисельника на одиницю більше ступеня знаменника. Таким чином, введення поправки на напружений стан доцільно ввести у вигляді розподіл правої частини (15) на відношення головних напруг σ_1/σ_2 , або, що те ж саме, множенням на відношення меншої головної напруги до більшого.

В остаточному вигляді шуканий критерій, який ми назвемо показник відносної міцності, визначається:

$$P_y = 10 \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\cos\varphi} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 - \tau^2 \operatorname{tg}\varphi}}{\tau_{zx}}, \quad (16)$$

де числовий коефіцієнт 10 був уведений для наочності при побудові ліній рівних показників стійкості.

Недоліком даної методики є той факт, що вона не дає точних кількісних характеристик стійкості ґрунтів земляного полотна, не може служити для оцінки абсолютної близькості стану до стану руйнування. Однак цим недоліком більшою чи меншою мірою страждають усі методики, де граничні характеристики міцності, фігуруючі в зіставленнях, отримані побічно на основі даних про напружений стан ґрунту про використання будь-якої теорії міцності. Так, не можна стверджувати, що достатньою умовою руйнування є досягнення дотичною напругою свого граничного значення, обчисленого у відповідності з теорією Мора-Кулона як і не обов'язковим є збіг майданчика обвалення з майданчиком з найменш вигідним співвідношенням між дотичним і нормальним.

Позбутися цього недоліку можна лише шляхом отримання дійсних міцнісних характеристик ґрунту (в даному випадку - його опору зсуву як граничної дотичної напруги на майданчику, що

цікавить нас) з експериментальних досліджень складових насипу ґрунтів, тобто безпосередньо із досвіду.

Разом з тим, запропонований критерій переконливо відображає якісну картину розподілу відносної міцності ґрунтів по поперечному перерізу насипу, виявляє місце розташування, розмір і форму найбільш небезпечних зон в сенсі близькості до граничного стану, і, слід вважати, найбільш схильних до обвалення.

Зручним і ефективним стало застосування показника відносної міцності до порівняльної оцінки насипів різного поперечного перерізу (зокрема, з різною конфігурацією укосів) для виявлення оптимального варіанту, що характеризується найбільшою стійкістю небезпечних зон. Використання запропонованого критерію показового та для оцінки зменшення стійкості ґрунтів земляного полотна при впливі на нього несприятливих факторів, якими може виступати використання ґрунтів з ослабленими характеристиками міцності. Результати таких досліджень, проведених з урахуванням застосування показника відносної стійкості.

Аналіз стійкості еталонного насипу. Власна напруга ґрунтового масиву, поряд з напругами від тимчасового навантаження, надають значний вплив на експлуатаційну надійність земляного полотна автомобільної дороги; причому їх частка в загальній сумі напруг істотно зростає в міру збільшення висоти насипу. Тому, ставлячи своєю метою аналіз і зіставлення існуючих методів оцінки напруженого стану дорожніх насипів, ми зробили головний акцент на розрахунок напруг у тілі високих дорожніх насипів, складених зв'язними ґрунтами як найбільш часто застосовуваними для споруд.

Еталонний насип у дослідженнях представлений такими характеристиками: висота - 14 м; ширина по верху - 15 м; крутість укосів - 1:1,5 (по всій висоті); ґрунт - суглинок щільністю $1,8 \text{ г/см}^3$ і середнім значенням коефіцієнта Пуассона = 0,3.

При дослідженні питань стійкості великий інтерес представляє проблема визначення найбільш ймовірних форм і положення поверхні ковзання частини ґрунтового масиву, що втратила міцність. Так як запропонована методика не передбачає завдання будь-якої передумови в тому відношенні, що було вирішено отримати потенційні поверхні ковзання графічним побудовою, виконаним у відповідності з відомим положенням теорії Мора-Кулона про те, що при втраті стійкості ковзання відбувається по майданчику дії граничних дотичних напруг, причому з найбільшим, тобто найменше вигідним співвідношенням між нормальними і зсувними напругами.

Для кожного елемента земляного полотна досліджуваного еталонного насипу кут між горизонтальною і граничною дотичною напругою, отриманий із співвідношення

$$(\tau_{zx}, \tau_{gp}) = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\arcsin \frac{2\tau}{\sigma_1 - \sigma_2}}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) \frac{180}{\pi}, \text{ град} \quad (17)$$

та визначив нахил майданчика ковзання до горизонталі.

Для наочності побудови були показані також абсолютні значення величин напруг

$$\tau_{gp} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos \varphi. \quad (18)$$

Характерним тут є їх зменшення з наближенням до укосу та іншим вільним поверхням як у вертикальних стовпах елементів, так і в горизонтальних шарах. Ця закономірність спотворюється лише поблизу вертикальних меж схеми поперечного перерізу, тобто в зонах, значно віддалених від укосу.

Майданчики ковзання, побудовані для центрів кінцевих елементів і – по інтерполяції в міжцентрових областях, дозволили викреслити лінії, що стосуються яких у кожній точці ґрунтового масиву збігаються з напрямком майданчиків ковзання. Відповідно до теорії Мора-Кулона ці криві є потенційними поверхнями ковзання.

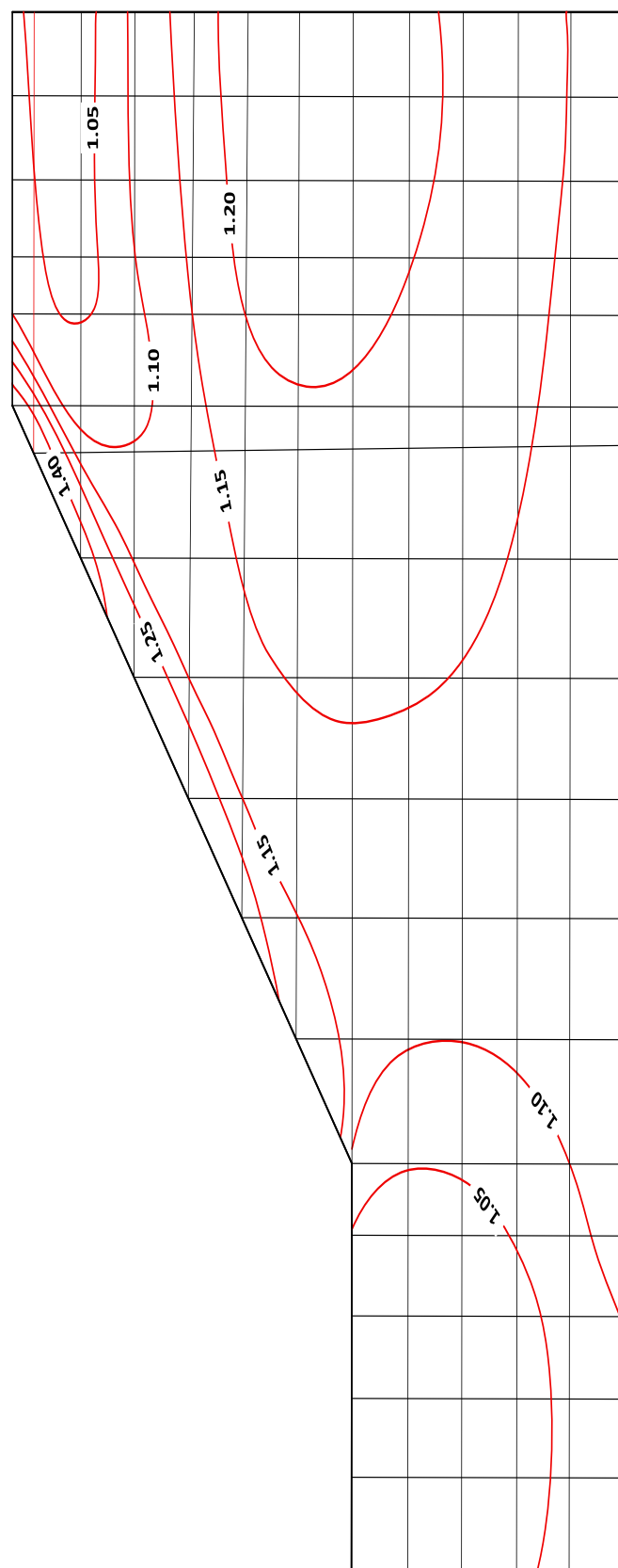


Рисунок 3 - Ізолінії рівних відносин τ_{max}/τ_{gran} для еталонної насадки
Figure 3 - Equal relationship contours τ_{max}/τ_{gran} for the reference pile

Аналіз форми цих поверхонь виявляє їх тенденцію до паралельності укосу, особливо для кривих, що заглиблюються в основу. Аналіз форми цих поверхонь виявляє їх тенденцію до паралельності укосу, особливо для кривих, що заглиблюються в основу. Що стосується останніх, то, дійсно, в елементах, що належать до нижньої брівки укосу нахил майданчиків ковзання близький до горизонтального, а це свідчить про найбільшу крутість поверхні ковзання в цій області та її вихід на вільну поверхню основи. В цілому, більшою прогнутістю характеризуються криві, розташовані ближче до верхньої частини укосу. Ці результати добре узгоджуються з даними досліджень Крижанівського [3, 5, 6], який дійшов висновку про те, що побудовані та використанні дані МСЕ поверхні ковзання мають набагато більш пологі обриси порівняно з круглоциліндричними, і особливо яскраво це проявляється при збільшенні висоти насипу.

Як зазначалося вище у пошуку критерію міцності стійкість еталонного насипу було прораховано щодо різноманітних виразів коефіцієнта запасу. Коротко зупинимося на результатах деяких із них.

На рисунку 3 представлені ізолінії рівних відносин коефіцієнта запасу, що визначається відношенням

$$k_3 = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{гр}}} . \quad (19)$$

Зазначимо: специфіка k_3 така, що найменш стійкою виявиться зона з $k_3 = 1$, а $k_3 > 1$ усього лише визначають ступінь близькості до граничного стану.

Треба сказати, що отримана картина стала протиріччям зробленим раніше прогнозам про мінімальну стійкість верхньої укосної зони. Значення k_3 зменшуються в міру наближення до нижньої брівки земляного полотна і далі по вільній поверхні основи. Разом з тим її позитивним моментом є наявність деякої відносної зони, що проходить по опуклостям ізоліній із значеннями $k_3 = 1.05$ та $k_3 = 1.10$ і між ізолініями з $k_3 = 1.15$. Її можна було б визначити як можливу поверхню обвалення. Те, що верхня частина цієї кривої відхиляється в бік осі і не виходить на вільну поверхню поперечного перерізу на перший погляд здається незвичайним, але тут слід зазначити, що поява пластичних зон по осі насипу паралельно або навіть раніше їх появи на укосах, відмічались цілим рядом авторів [3].

Подібне явище, хоч і виражене менш яскраво, має місце при розрахунку стійкості насипу з використанням:

$$k_3 = \frac{\tau_{\varphi}}{\tau_{\theta}} . \quad (20)$$

(Дивись формулу (12)). Це виявилось тут у значному відхиленні ізоліній у бік осі насипу.

Розподіл значень k_3 по поперечному перерізу насипу виявляє дві найменш стійкі зони, що огинають верхню і нижню брівки укосу, причому верхня має велику відносну близькість до граничного стану. Крім того, за результатами розрахунку найбільшою відносною стійкістю володіла верхня частина укосу, в той час, як саме там спостерігаються максимальні дотичні напруження і загальний високий рівень напруженого стану, а також найбільші величини переміщень. Це був перший аргумент у сенсі незадовільності даного критерію, вирішальним же чинником став той, що для укосів з меншою крутістю він дає менші значення k_3 , що говорить про його неприйнятність для порівняльного аналізу стійкості насипів різної конфігурації.

Звернемося тепер до результатів розрахунку показника відносної стійкості (18) елементів еталонної насипу.

Перше, що звертає на себе увагу, що ізолінії P_y , які являють собою проекції поверхонь з різною відносною міцністю ґрунтів, мають форму охоплюючу укіс кривих і в міру наближення до укосу у своїй найбільш пологій частині виявляють паралельність з вільною укісною поверхнею. Нагадуємо,

що цю ж тенденцію виявляють побудовані згідно з теорією Мора-Кулона потенційні поверхні ковзання. Як і передбачалося раніше найменш стійкою виявилася верхня частина укосу, яка, як уже не раз зазначалося, має найбільше значення отриманих чисельним розрахунком величин дотичних напруг τ_{zx} і горизонтальних переміщень, а також характеризується загальним високим рівнем напруженого стану.

Форма ізоліній у безпосередній близькості від поверхні укосу отримана інтерполяцією, так як визначається лише центрів тяжкості кінцевих елементів. У міру наближення до нижньої брівки земляного полотна кут виходу ізоліній на укіс збільшується і для кривих, що виходять на верхню межу основи становить майже 90° . Взагалі, слід зазначити, що лінії рівних значень P_y (особливо для $P_y = 6 \div 10$) за формою та розташуванням у тілі земляного полотна дуже нагадують поверхні ковзання, отримані рядом авторів.

Ізолінії великих значень P_y ($P_y = 10 \div 20$ і більше) формально також були огибаючими укіс, не замикаються в межах розрахункової схеми через свою значну поглибленість в основу під нижньою частиною укосу.

У вузьких зонах, що прилягають до осі насипу та вертикальної межі основи, спостерігається дуже швидке зростання величини показника відносної стійкості до високих абсолютних величин (30 і більше). Це дає підстави вважати про значний спотворює вплив закріплених меж розрахункової схеми на моделювання напруженого стану цих областей.

Це є особливо важливим у світлі існуючої думки про швидке досягнення деякою областю приукосної частини насипу свого граничного стану. У розподілі P_y це частково відбилося в існуючому мінімумі деякої горизонталі, паралельної верху конструкції.

Як ми побачили далі, таке явище має місце і для інших розрахункових схем.

Висновки: 1. У запропонованій методиці визначення параметрів зсувостійкості ґрунту реалізована гіпотеза про збільшення зчеплення в ґрунах (параметр C) зі зростанням рівня напруженого стану та зменшенням кута внутрішнього тертя зв'язних ґрунтів у порівнянні з сипучими внаслідок дії сил зв'язності (що визначаються зчепленням).

2. Потенційні поверхні ковзання, отримані у відповідності з теорією Мора-Кулона, для високого насипу мають набагато пологіший обрис, ніж круглоциліндричні (такого ж висновку дійшов і ряд інших авторів).

3. Для оцінки стійкості високих дорожніх насипів запропоновано показник відносної стійкості P_y , що визначається як співвідношення між відносинами дотичних і нормальних напруг на граничних та горизонтальних майданчиках з поправкою на напружений стан для кожного з кінцевих елементів поперечного перерізу. Вибраний критерій дозволяє отримати переконливу якісну картину розподілу міцності ґрунту, що складає насип, по поперечному перерізу в залежності від його напруженого стану. Ізолінії P_y описують форму і положення найбільш небезпечних у плані руйнування зон. Він зручний і показовий під час аналізу впливу зміни укосів і водно-теплогового режиму на стійкість насипу. Разом з тим, його недоліком є те, що він не дає точних кількісних характеристик близькості до граничного стану.

4. Застосування P_y до аналізу стійкості еталонного насипу (розрахована схема, насип - пружна основа з постійною крутістю укосів) свідчать про наявність найменш стійкої області у верхній частині укосу, що характеризується в той же час найбільшими значеннями дотичних напруг, горизонтальних переміщень і загальним високим рівнем напруженого стану. Виявилася також явна аналогія огинаючий укос форми ізоліній P_y з формою поверхонь ковзання, отриманих у роботах інших авторів.

Перелік посилань

1. Adaptive traffic signal optimization with thermal sensors and reinforcement learning / A. Balashov, O. Ponomarova, Y. Balashova, O. Tregub. *Results in Engineering*. 2026. Vol. 29. 108601. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108601>.
2. Małe J. Ogólna metoda sprawdzania stateczności zboczy wzdłuż dowolnych powierzchni poślizgu. Cz. II. Ocena poprawności metody równowagi granicznej. *Arch. Hydrotechn.* 1978. Vol. 25, nr 4. S. 491–510.
3. Крижанівський А. Л., Куликов О. В. До розрахунку стійкості відкосів. *Гідротехнічне будівництво*. 1977. № 5. С. 38–44.
4. Naibor D. J. Finite elements and slope stability. *Numerical methods in geomechanics* / Department of Civil Engineering, University College of Swansea. P. 229–244.
5. Заворицький В. Й. Дослідження розподілу напружень у приукосній зоні земляного полотна. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : зб. наук. пр. Київ : Будівельник, 1984. Вип. 35. С. 6–12.
6. Заворицький В. Й. Вплив геометрії і властивостей ґрунту на напружено-деформований стан системи «насип — основа». *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : зб. наук. пр. Київ : Будівельник, 1985. Вип. 36. С. 8–17.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE STABILITY OF EMBANKS TAKING INTO ACCOUNT THEIR STRESSED STATE

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. This article examines the assessment of the stability of road embankments, taking into account their stress-strain state. Based on Mohr–Coulomb strength theory and the results of numerical modelling, a criterion for the relative strength of subgrade soils is proposed. An analysis of the stress state of a reference embankment has been carried out, and the distribution of critical zones within its cross-section has been determined. The possibility of using the proposed indicator for the comparative assessment of the stability of embankments with different geometries and for identifying potential slip surfaces has been demonstrated.

Keywords: road embankment, slope stability, stress-strain state, Mohr–Coulomb theory, soil strength, relative strength index, slip surfaces, finite element method.

References

1. Balashov, A., Ponomarova, O., Balashova, Y., & Tregub, O. (2026). Adaptive traffic signal optimization with thermal sensors and reinforcement learning. *Results in Engineering*, 29, 108601. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108601>.
2. Małe, J. (1978). Ogólna metoda sprawdzania stateczności zboczy wzdłuż dowolnych powierzchni poślizgu. Cz. II. Ocena poprawności metody równowagi granicznej [General method for checking the stability of slopes along arbitrary slip surfaces. Part II. Evaluation of the correctness of the limit equilibrium method]. *Arch. Hydrotechn.*, 25(4), 491–510. [in Polish].
3. Kryzhanivskiy, A. L., & Kulykov, O. V. (1977). Do rozrakhunku stikosti vidkosiv [On the calculation of slope stability]. *Hidrotekhnichne budivnytstvo [Hydrotechnical Construction]*, (5), 38–44. [in Ukrainian].
4. Naibor, D. J. Finite elements and slope stability. *Numerical methods in geomechanics*. Department of Civil Engineering, University College of Swansea, pp. 229–244.
5. Zavorytskyi, V. Y. (1984). Doslidzhennia rozpodilu napruzhen u priukosnii zoni zemlianogo polotna [Investigation of stress distribution in the near-slope zone of the roadbed]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo [Automobile Roads and Road Construction]*, (35), 6–12. [in Ukrainian].
6. Zavorytskyi, V. Y. (1985). Vplyv gheometrii i vlastyvostei gruntu na napruzhenodeformovanyi stan systemy “nasyp – osnova” [Influence of geometry and soil properties on the stress-strain state of the "embankment-foundation" system]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo [Automobile Roads and Road Construction]*, (36), 8–17. [in Ukrainian].

Дата надходження до редакції 17.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 02.02.2026.

УДК 624.131.54
UDC 624.131.54

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-314-323

**ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕОРЕШІТОК ДЛЯ ЧИСЛОВОГО
МОДЕЛЮВАННЯ В PLAXIS 2D**

**DETERMINATION OF DESIGN PARAMETERS OF GEOGRIDS FOR NUMERICAL
MODELLING IN PLAXIS 2D**



Савенко В'ячеслав Якович, Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету, e-mail: svi1310@ukr.net,

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



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

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



Плитус Ростислав Михайлович, доктор філософії, інженер за напрямом проєктування та інжинірингу, ТОВ «Уніпром», Київ, Україна, e-mail: rostmuh@gmail.com, тел. +380683023326

<https://orcid.org/0000-0001-7319-4094>



Харін Павло Леонідович, директор за напрямом проєктування та інжинірингу, ТОВ «Уніпром», Київ, Україна, e-mail: kxarin@ukr.net, тел. + 380504135950

<https://orcid.org/0000-0001-7858-0912>

Анотація: У статті представлено дослідження числового моделювання полімерних жорстких георіток у програмному комплексі Plaxis 2D з метою оцінки їх впливу на стійкість і деформаційні характеристики армованих ґрунтових конструкцій. Розглянуто методику визначення ключових параметрів георіток, таких як короткострокова і довгострокова міцність, осьова жорсткість та деформаційні властивості під дією очікуваних навантажень. Проведено аналіз впливу температурних

режимів, терміну служби матеріалу та умов експлуатації на міцність і деформаційну поведінку геораток серії Tensar RE.

Особлива увага приділена налаштуванню контактних зон між геораткою та ґрунтом, що дозволяє врахувати тертя та зчеплення і забезпечує реалістичне відтворення механіки взаємодії матеріалів у армованих ґрунтах. Використання як еластичних, так і еластопластичних моделей дає змогу більш точно оцінити поведінку армованих ґрунтових систем під різними типами навантажень. Проведений аналіз дозволяє прогнозувати розподіл напружень і переміщень у конструкції, оцінювати ефективність армування та визначати критичні ділянки для інженерного проектування.

Результати дослідження демонструють, що числове моделювання в Plaxis 2D є потужним інструментом для оптимізації проектування інженерних споруд із армованих ґрунтів, забезпечення їх довговічності та мінімізації ризику деформацій. Використання розробленої методики дозволяє інженерам приймати обґрунтовані рішення при виборі геораток, налаштуванні параметрів конструкцій та прогнозуванні поведінки системи «ґрунт–георатка» в реальних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: георатка, армований ґрунт, числове моделювання, Plaxis 2D, короткострокова міцність, довгострокова міцність, контактна зона георатка-ґрунт, еластичні та еластопластичні моделі, армоґрунтові підпирні стінки, земляне полотно автомобільних доріг

Вступ. У сучасних геотехнічних дослідженнях особливу увагу приділяють застосуванню геосинтетичних матеріалів, серед яких ключову роль для підвищення стійкості та довговічності ґрунтових конструкцій відіграють георатки. Георатки широко застосовують у дорожньому будівництві для армування ґрунтів у насипах, в армоґрунтових підпирних стінках та інших інженерних спорудах з метою зменшення деформацій та зміцнення основи в умовах залягання слабких ґрунтів. Ефективність використання таких матеріалів значною мірою залежить від правильно підібраних фізико-механічних характеристик. Такі матеріали забезпечують оптимальну взаємодію з ґрунтом та запобігають надмірним осіданням і зсувам.

Розв’язання інженерних задач у геотехніці передбачає поєднання експериментальних методів із числовим моделюванням поведінки армоґрунтових систем. В такому контексті програмний комплекс Plaxis 2D є ефективним інструментом для більш точного моделювання таких конструкцій. Застосування цього інструменту дозволяє задавати ключові параметри геораток, а саме відносне видовження при розтягу, міцність на розрив, модуль пружності та враховувати їх взаємодію з ґрунтом за рахунок встановлення параметрів контактної зони. Це дозволяє змодельовати взаємодію шляхом тертя та адгезії на межі «ґрунт–георатка». Такий підхід забезпечує більш реалістичне відображення поведінки конструкцій під статичними та динамічними навантаженнями (зовнішні навантаження від рухомого складу та від власної ваги ґрунтової конструкції).

Метою проведеного дослідження є визначення розрахункових параметрів та деформаційних характеристик геораток для адекватного моделювання в Plaxis 2D, а також обґрунтування оптимальних параметрів їх застосування з урахуванням реальних інженерних умов. Отримані результати сприятимуть підвищенню точності числового моделювання, зменшенню ризиків деформацій та руйнувань конструкцій та забезпеченню їх надійності протягом усього терміну служби.

Виклад основного матеріалу. Моделювання геораток у програмному комплексі Plaxis 2D є важливою складовою аналізу армоґрунтових конструкцій. Георатки широко застосовуються для підсилення ґрунтів, підвищення їх стійкості, зменшення деформацій та забезпечення більш рівномірного розподілу навантажень у ґрунтовому масиві. Використання геораток дозволяє ефективно підвищити несну здатність основ і зменшити ризик розвитку надмірних осідань та зсувних деформацій, особливо в умовах слабких або неоднорідних ґрунтів.

Аналіз наукових досліджень, зокрема робіт [1] та [2], свідчить про те, що під час моделювання геораток у Plaxis 2D часто використовуються стандартні характеристики міцності матеріалу без урахування його еластопластичної або пластичної поведінки. Такий підхід не завжди дозволяє

адекватно відобразити реальну роботу армогрунтових систем, що є суттєвим аспектом з точки зору об'єктивності та правильності інженерних розрахунків, особливо при аналізі довготривалої експлуатації конструкцій.

Процес числового моделювання геораток у Plaxis 2D зазвичай включає такі основні етапи: вибір типу елемента армування, введення фізико-механічних властивостей матеріалу, налаштування контактної зони між ґрунтом і геораткою, позиціонування армувальних елементів у розрахунковій схемі, задання навантажень і граничних умов, а також аналіз та інтерпретацію отриманих результатів.

Моделювання георатки в програмному комплексі Plaxis 2D починається з вибору відповідного типу матеріалу та визначення його фізико-механічних характеристик. Насамперед визначаються основні параметри георатки, зокрема відносне видовження при розтягу, міцність на розрив і січний модуль пружності. Саме ці параметри є визначальними для коректного відтворення взаємодії між геораткою та ґрунтом, оскільки від них залежить напружено-деформований стан армованої конструкції та її загальна стійкість.

На наступному етапі задаються граничні умови та навантаження, які повинні відповідати реальним умовам експлуатації інженерного об'єкта. Для підпірних стінок і дорожніх насипів, зокрема, необхідно враховувати як динамічні навантаження, зумовлені рухом транспорту, так і статичні навантаження від власної ваги споруди. Коректне визначення граничних умов забезпечує отримання результатів числового моделювання, що є максимально наближеними до реальної роботи конструкції.

У процесі моделювання також необхідно враховувати фізико-механічні характеристики ґрунту, з яким взаємодіє георатка. До таких параметрів належать щільність ґрунту, кут внутрішнього тертя, коефіцієнт тертя та зчеплення. Урахування цих характеристик дозволяє адекватно змоделювати армогрунтову систему, в якій георатка виконує роль елемента підсилення, сприяючи рівномірному перерозподілу навантажень і зменшенню вертикальних та горизонтальних переміщень.

Ключовим етапом числового моделювання є налаштування контактної зони між ґрунтом і геораткою. У Plaxis 2D контактна зона реалізується за допомогою спеціальних контактних елементів, які дозволяють моделювати тертя та адгезію на межі «георатка–ґрунт». Урахування контактної взаємодії є особливо важливим у випадках можливого ковзання або відносних зміщень між матеріалами, оскільки ці процеси можуть суттєво впливати на загальну стійкість армованої конструкції.

Наступним кроком є проведення числового аналізу моделі. У ході розрахунків визначаються осідання, напружено-деформований стан конструкції, а також оцінюється загальна стійкість системи «ґрунт–георатка». Порівняння результатів, отриманих із застосуванням еластичних та еластопластичних моделей, дозволяє більш повно оцінити поведінку армогрунтової конструкції під різними видами навантажень.

Особливу увагу в даному дослідженні приділено аналізу короткострокової та довгострокової міцності геораток. Георатки Tensar RE досліджувалися з урахуванням впливу температурних умов і тривалості навантаження. Зокрема, проаналізовано вплив 120-річного розрахункового терміну служби матеріалу на його міцнісні та деформаційні характеристики. Згідно з результатами досліджень [3], температурні режими суттєво впливають на пружні властивості полімерних матеріалів, що безпосередньо відображається на стійкості армогрунтових конструкцій.

На початковому етапі моделювання георатки в Plaxis 2D як правило задаються у вигляді геотекстильних або армувальних лінійних елементів із відповідними механічними властивостями, основною з яких є жорсткість на розтяг. Такий підхід до моделювання взаємодії між армованим ґрунтом і георатками наведено в [5]. Значення розрахункових параметрів залежать від температури експлуатації, умов взаємодії з ґрунтом та розрахункового терміну служби георатки.

У подальшому всі розрахункові дані приймаються для регіону з температурним режимом 20 °C та розрахунковим терміном служби георатки 120 років, що відповідає типовому строку експлуатації поліпропіленових геосинтетичних матеріалів.

У даній роботі розглядається визначення розрахункових міцнісних характеристик геораток Tensar RE, які можуть бути використані для числового моделювання в програмному комплексі

Plaxis 2D. Вихідні механічні характеристики геораток наведено в таблиці 1. Однак для коректного числового аналізу необхідно перейти від номінальних значень міцності до розрахункової довготривалої міцності, що враховує вплив часу навантаження та температурних умов експлуатації.

Розрахункова міцність георатки визначається на основі оцінки її повзучості з використанням логарифмічної залежності між часом дії навантаження та допустимим рівнем напружень. Для цього спочатку визначається параметр x , який характеризує тривалість навантаження з урахуванням коефіцієнта зсуву за температурою:

$$x = \lg(120 \cdot 365 \cdot 24 \cdot P_{sf}), \quad (1)$$

де $120 \cdot 365 \cdot 24$ — розрахунковий термін служби георатки в годинах (120 років);

P_{sf} — коефіцієнт зсуву, що враховує вплив температури експлуатації матеріалу.

Наступним етапом є визначення нижньої межі міцності на розрив при повзучості, яка описується емпіричною регресійною залежністю другого порядку

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (2)$$

де $x = \lg(t)$ — логарифм часу дії навантаження;

$y = \lg(\sigma)$ — логарифм допустимого нормального навантаження (міцності при розтягненні);

A, B, C — коефіцієнти регресії, отримані за результатами експериментальних випробувань геораток виробника.

Отримане значення у використується для визначення допустимої довготривалої міцності георатки, яка надалі застосовується як розрахунковий параметр при моделюванні армованих ґрунтових конструкцій у Plaxis 2D.

Таблиця 1 – Характеристики полімерних жорстких одновісноорієнтованих георешіток лінійки Tensar RE

Table 1 – Properties of polymer rigid uniaxially oriented geogrids of the Tensar RE series

Лінійка георешіток	Pc	RF _{CR}	fs	RF _{ID}	RF _W	RF _{CH}	Np	QC	Pdes
RE510	19,01	2,104	1,00	1,01	1,00	1,00	18,83	40,00	39,60
RE520	25,10	2,104	1,00	1,00	1,00	1,00	25,10	52,80	52,80
RE540	30,66	2,104	1,00	1,00	1,00	1,00	30,66	64,50	64,50
RE560	42,16	2,104	1,00	1,00	1,00	1,00	42,16	88,70	88,70
RE570	56,28	2,104	1,00	1,00	1,00	1,00	56,28	118,40	118,40
RE580	65,27	2,104	1,00	1,00	1,00	1,00	65,27	137,30	137,30

Значення P_c це міцність георатки заочно від нижньої межі міцності на розрив, визначається за формулою:

Короткострокова міцність георатки, приведена з урахуванням повзучості, визначається за формулою:

$$P_c = Q_c \cdot 10^y \quad (3)$$

де Q_c — номінальна короткострокова міцність георатки;

y — логарифмічне значення нижньої межі міцності на розрив при повзучості.

Для врахування впливу умов експлуатації та запасу надійності вводяться відповідні коефіцієнти редукції та безпеки [9]:

RF_{CR} — коефіцієнт редукції, що враховує відношення короткострокової міцності геогратки до її довготривалої міцності з урахуванням повзучості;

F_s — коефіцієнт запасу стійкості;

RF_{ID} — коефіцієнт, що враховує механічні пошкодження геогратки під час монтажу;

RF_W — коефіцієнт впливу ультрафіолетового випромінювання;

RF_{CH} — коефіцієнт хімічного впливу та впливу зовнішнього середовища.

Розрахункова довготривала міцність геогратки з урахуванням усіх коефіцієнтів (нижньої межі міцності на розрив та експлуатаційних факторів) визначається за формулою:

$$N_p = P_c \cdot F_s \cdot RF_{ID} \cdot RF_W \cdot RF_{CH}. \quad (4)$$

Розрахункове значення короткострокової міцності геогратки, приведене з урахуванням коефіцієнтів запасу та умов експлуатації, визначається як:

$$P_{des} = Q_c \cdot F_s \cdot RF_{ID} \cdot RF_W \cdot RF_{CH}, \quad (5)$$

де P_{des} — розрахункова короткострокова міцність геогратки.

Короткострокова та довгострокова міцність геогратки є двома ключовими показниками, що характеризують поведінку матеріалу під різними типами навантажень і в різних умовах експлуатації. Урахування обох характеристик є необхідним для коректного прогнозування роботи армогрунтових конструкцій протягом усього терміну їх служби.

Короткострокова міцність відображає здатність геогратки сприймати значні навантаження протягом обмеженого проміжку часу. Цей параметр має особливе значення на етапі будівництва, коли конструкція зазнає інтенсивних впливів, пов'язаних із монтажем, ущільненням ґрунту та прикладанням початкових навантажень. До короткострокових впливів також належать тимчасові навантаження від будівельної техніки та транспортних засобів.

Довгострокова міцність характеризує поведінку геогратки за умов тривалого впливу постійних навантажень, таких як власна вага насипу, конструкції або споруди. У довгостроковій перспективі визначальним чинником є повзучість полімерного матеріалу, тобто його поступове деформування під дією сталого навантаження. Окрім цього, на довгострокову міцність істотно впливають температурний режим експлуатації та хімічні властивості навколишнього середовища.

Під час числового моделювання в програмному комплексі Plaxis 2D урахування як короткострокової, так і довгострокової міцності дозволяє оцінити поведінку геогратки на всіх етапах експлуатації конструкції. Використання лише короткострокових характеристик може призвести до недооцінки ефектів повзучості та, як наслідок, до прогнозування занижених деформацій у майбутньому. Довгострокова міцність є критично важливою для оцінки стабільності конструкцій з тривалим терміном служби, зокрема насипів і підпірних стінок. Комплексний підхід до врахування обох типів міцності дозволяє підвищити надійність і довговічність інженерних рішень та мінімізувати ризик розвитку надмірних деформацій або руйнувань з часом.

Визначення зазначених характеристик є необхідним для приведення базових параметрів геогратки, що використовуються при числовому моделюванні, зокрема:

- ЕА (осьова жорсткість) — параметр, що визначає здатність геогратки сприймати розтягувальні зусилля;
- модуль пружності, який застосовується для опису деформаційних властивостей матеріалу;
- адгезія та тертя між геограткою і ґрунтом, що враховуються через параметри контактної зони.

Для визначення осьової жорсткості ЕА необхідно враховувати, що вона має як короткострокові, так і довгострокові значення [4], які залежать від температурного режиму експлуатації геогратки.

Детальний розрахунок виконано на прикладі геогратки марки Tensar RE580. Для визначення значень ЕА прийнято тривалість короткострокових випробувань $t_{short} = 730$ год, а довгострокових — $t_{long} = 1\,051\,920$ год, відповідно до [6].

Температурний режим прийнято рівним 20 °С. Номінальна короткострокова міцність геогратки становить $Q_c = 137,30$ кН/м (таблиця 1).

Фактичний рівень робочого навантаження для визначення деформаційних характеристик прийнято на рівні 15 % від короткострокової міцності геогратки:

$$AC_{lv} = Q_c \cdot \frac{15}{100}. \quad (6)$$

На основі цього навантаження визначаються короткострокове та довгострокове значення осьової жорсткості геогратки залежно від відповідного видовження. Вихідними даними для геогратки RE580 є: температура випробувань — 20 °С, максимальна крупність частинок заповнювача — 6 мм, ступінь покриття геограткою — 100 %, розрахунковий термін служби — 120 років, тривалість короткострокових випробувань — 730 год, а також нормоване навантаження — 15 %.

Короткострокова та довгострокова осьова жорсткість визначається за залежністю:

$$EA_{short/long} = Q_c \cdot \frac{15}{100} \cdot \frac{1}{STR}, \quad (7)$$

де STR — видовження геогратки, яке визначається за формулою:

$$STR = A_{par} \cdot \ln(t_{short/long}) + B_{par}, \quad (8)$$

де $A_{par} = 0,12393$ — коефіцієнт, що враховує вплив рівня навантаження;

$B_{par} = 1,3023888$ — емпіричний коефіцієнт;

$t_{short/long}$ — тривалість випробування, год.

Наведені коефіцієнти видовження є емпіричними та отримані шляхом статистичної обробки результатів довготривалих випробувань полімерних геограток Tensar RE за температури 20 °С відповідно до вимог стандарту ISO 13431. Застосована регресійна модель забезпечує безперервний опис деформаційної поведінки геогратки як у короткостроковому, так і в довгостроковому режимах навантаження, що дозволяє коректно визначати осьову жорсткість матеріалу з урахуванням фізичної природи повзучості полімерних геосинтетиків.

Нормоване навантаження на рівні 15 % від короткострокової міцності Q_c є загальноприйнятим у міжнародній практиці випробувань геосинтетичних матеріалів на повзучість (ISO 13431:1999). Такий рівень напружень відповідає типовим умовам роботи армованих ґрунтових конструкцій і водночас забезпечує отримання репрезентативних деформаційних характеристик без передчасного руйнування зразка. Значення 10–30 % від Q_c вважається стандартним діапазоном для аналізу довгострокової поведінки полімерних матеріалів, а вибір 15 % дозволяє найбільш коректно описати експлуатаційні умови насипів і підпірних стінок.

Для виконання числових розрахунків у режимах Elastic та Elastoplastic як вихідні міцнісні характеристики геогратки використовуються значення осьової жорсткості, визначені за залежністю (7). За результатами розрахунку отримано такі значення: $EA_{short} = 972$ кН/м — для короткострокового режиму; $EA_{long} = 682$ кН/м — для довгострокового режиму експлуатації.

Для визначення параметрів геогратки в еластопластичній моделі типу N-ε (Elastoplastic) необхідно змоделювати її поведінку за умов змінної частки очікуваного навантаження. З цієї метою використовується формула (6), яка дозволяє визначати рівень прикладеного навантаження як частку від короткострокової міцності геогратки. Такий підхід забезпечує можливість побудови нелінійної діаграми деформування матеріалу та коректного опису його пластичної поведінки.

На основі виконаних розрахунків сформовано зведену таблицю вихідних параметрів для моделювання характеристик EA та N_p георатки в програмному комплексі Plaxis 2D у режимі Elastoplastic (N-ε).

Таблиця 2 – Значення параметрів для числового моделювання георатки в еластопластичній моделі (N-ε)

Table 2 – Input parameters for numerical modelling of geogrid behaviour using the elastoplastic (N-ε) model

Навантаження (%)	Видовження (-)	N (kN/m)	EA ₁ (kN/m)
0	0,000000	0,000	0,00
0,5	0,000675	0,687	1017,8
1	0,001375	1,373	998,4
2	0,002854	2,746	962,3
5	0,007880	6,865	871,2
10	0,018064	13,730	760,1
20	0,043968	27,460	624,5
40	0,108287	54,920	507,2

Аналогічний підхід до визначення розрахункових параметрів застосовано для решти геораток лінійки Tensar RE510–RE570. Для виконання числових розрахунків у режимах Elastic та Elastoplastic як вихідні міцнісні характеристики використовуються значення осової жорсткості, визначені за залежністю (7). Зазначена формула застосовується для визначення відповідних характеристик усієї лінійки геораток серії RE.

На основі отриманих результатів сформовано зведену таблицю розрахункових параметрів, що використовуються для числового моделювання геораток серії RE у програмному комплексі Plaxis 2D.

Таблиця 3 – Характеристики геораток серії RE, прийняті для числового розрахунку в програмному комплексі Plaxis 2D

Table 3 – Properties of Tensar RE geogrids adopted for numerical analysis in PLAXIS 2D

Лінійка геораток	EA _{short}	EA _{long}	N _{p,1}
RE510	283,1	198,6	18,83
RE520	373,7	262,2	25,10
RE540	456,5	320,3	30,66
RE560	627,8	440,4	42,16
RE570	837,9	587,9	56,28
RE580	971,7	681,8	65,27

Наступним етапом моделювання є налаштування контактних зон між геораткою та ґрунтом, що є критично важливим для точного відтворення взаємодії матеріалів у армованих конструкціях.

Контактні зони дозволяють моделювати реальний контакт між геораткою і ґрунтом з урахуванням таких фізичних параметрів, як коефіцієнт тертя та адгезія. Вони визначають, наскільки матеріали можуть ковзати відносно один одного або, навпаки, утримуватися на місці завдяки зчепленню. Це забезпечує більш реалістичне відтворення механізму передачі навантаження від ґрунту до георатки і навпаки.

Налаштування контактних зон включає визначення таких параметрів як коефіцієнт тертя, що характеризує опір ковзанню між геораткою та ґрунтом; коефіцієнт зчеплення, який визначає силу, що протидіє початковому зриву контакту; можливість обмеженого або повного зсуву, що дозволяє моделювати локальні переміщення та деформації.

Використання контактних зон є особливо важливим у випадках, коли армовані конструкції піддаються динамічним або нерівномірним навантаженням, а саме:

- дорожні насипи, що експлуатуються під рухом транспорту;
- підпірні стінки, які зазнають нерівномірного тиску ґрунту та сезонних коливань вологості;
- споруди на слабких ґрунтах, де локальні зсуви можуть впливати на загальну стійкість системи.

Правильне визначення контактних зон дозволяє інженерам оцінювати вплив різних сценаріїв навантаження на конструкцію, проводити чутливісний аналіз та прогнозувати поведінку армованих ґрунтів у коротко- та довгостроковій перспективі. Крім того, це дає змогу виявляти потенційні проблемні ділянки, де можливе виникнення локальних деформацій або втрати стійкості.

Таким чином, застосування контактних зон у Plaxis 2D підвищує точність числового моделювання, дозволяє враховувати складні механізми взаємодії ґрунту і георатки та забезпечує основу для обґрунтованого проєктного рішення, що гарантує надійність і довговічність армованих конструкцій.

Висновки

Використання геораток є ефективним засобом підвищення стабільності ґрунтових конструкцій, зокрема дорожніх насипів, підпірних стінок та слабких основ. Георатки забезпечують більш рівномірний розподіл навантажень, зменшують деформації та підвищують загальну стійкість системи «ґрунт–георатка».

Моделювання полімерної жорсткої георатки в програмному комплексі Plaxis 2D дозволяє більш точно оцінити її вплив на стійкість і деформаційні характеристики ґрунтових конструкцій. Застосування контактних зон для врахування взаємодії між ґрунтом і геораткою є ключовим для реалістичного моделювання армованих систем, оскільки це дає змогу адекватно відтворити тертя та адгезію між матеріалами. Правильне налаштування цих параметрів дозволяє відобразити реальну поведінку георатки у складних інженерних умовах. Числове моделювання в Plaxis 2D дозволяє враховувати фізико-механічні характеристики матеріалу, граничні умови, параметри контактних зон і властивості ґрунту, що забезпечує реалістичну оцінку поведінки конструкцій у різних умовах експлуатації.

Для адекватного моделювання важливо враховувати як короткострокову, так і довгострокову міцність геораток: перша відображає здатність матеріалу витримувати інтенсивні тимчасові навантаження, а друга дозволяє оцінити вплив повзучості, тривалого постійного навантаження, температури та хімічного середовища. Аналіз геораток серії Tensar RE показав, що їх ефективність значною мірою залежить від таких параметрів, як короткострокова та довгострокова міцність, осьова жорсткість та температурні умови експлуатації. Врахування температурних режимів та терміну служби дозволяє робити обґрунтовані прогнози щодо довговічності конструкцій. Визначення осьової жорсткості ЕА на основі вихідної міцності та допустимого навантаження дає змогу коректно моделювати поведінку геораток у коротко- та довгостроковій перспективі. Застосування регресійних моделей та емпіричних коефіцієнтів видовження забезпечує узгодженість числової моделі з фізичною природою повзучості полімерних матеріалів.

Моделювання контактних зон між геораткою та ґрунтом дозволяє враховувати тертя та адгезію, обмежувати або допустити зсув, що істотно впливає на стійкість конструкцій. Використання як еластичних, так і еластопластичних моделей дає змогу повніше оцінити поведінку армованих ґрунтів під навантаженням, що сприяє прийняттю більш зважених інженерних рішень.

Отримані розрахункові параметри для лінійки геораток Tensar RE можуть бути використані для оптимізації проєктування армованих ґрунтових конструкцій, що дозволяє інженерам приймати обґрунтовані рішення, мінімізувати ризики деформацій і забезпечити довговічність споруд.

Перелік посилань

1. 2D Modelling of Geosynthetically Reinforced Piled Embankments: Calibration Methods in PLAXIS 2D & Review of Analytical Guidelines, TRITA-ABE-MBT 2120, 2021, p. 118.
2. Evaluation of the Efficiency of the Standardized Norrland Method, Validerat 20160225, 2016, p. 124.
3. Geogrids in cold climate: Temperature controlled tensile tests & Half-scale installation tests at different temperatures, Trafikverket, 2017, p. 115.
4. ISO 10318-1:2015 — Geosynthetics. Part 1: Terms and definitions.
5. ISO 25619-1:2008 — Geosynthetics. Determination of tensile properties. Part 1: Single tensile test.
6. ISO 13431:1999 — Geotextiles and geotextile-related products. Determination of tensile creep and creep rupture behaviour.
7. EN 13251:2016 — Geotextiles and geotextile-related products. Characteristics required for use in earthworks, foundations and retaining structures.
8. EN 14475:2006 — Execution of special geotechnical works. Reinforced fill.
9. Analysis of Strength Parameters of Polymer Geogrids in Reinforced Soil Structures of Roads and Highways, UDC 625.7/8, DOI: 10.33744/2308-6645-2022-3-53-370-377.

DETERMINATION OF DESIGN PARAMETERS OF GEOGRIDS FOR NUMERICAL MODELLING IN PLAXIS 2D

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

Usychenko Olena Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: fbbk@ukr.net, tel. +380442803942, <https://orcid.org/0000-0002-7482-8420>

Plytus Rostyslav M., Doctor of Philosophy, Engineer in Design and Engineering, Uniprom LLC, Kyiv, Ukraine, e-mail: rostmuh@gmail.com, tel. +380683023326, <https://orcid.org/0000-0001-7319-4094>

Kharin Pavlo L. Director of Design and Engineering, Uniprom LLC, Kyiv, Ukraine, e-mail: kxarin@ukr.net, tel. +380504135950, <https://orcid.org/0000-0001-7858-0912>

Summary. The article presents a study on the numerical modeling of polymer rigid geogrids in the Plaxis 2D software package, aimed at evaluating their influence on the stability and deformation characteristics of reinforced soil structures. The methodology for determining the key parameters of geogrids, such as short-term and long-term strength, axial stiffness, and deformation properties under expected loads, is considered. The study analyzes the effects of temperature conditions, material service life, and operating conditions on the strength and deformation behavior of Tensar RE geogrids.

Particular attention is given to the configuration of contact zones between the geogrid and soil, which allows accounting for friction and adhesion, ensuring a realistic representation of the interaction mechanics between materials in reinforced soils. The use of both elastic and elastoplastic models enables a more accurate assessment of the behavior of reinforced soil systems under various types of loads. The conducted analysis allows predicting stress and displacement distributions within the structure, evaluating reinforcement effectiveness, and identifying critical areas for engineering design.

The results demonstrate that numerical modeling in Plaxis 2D is a powerful tool for optimizing the design of engineered structures with reinforced soils, ensuring their durability and minimizing the risk of deformations. The developed methodology allows engineers to make informed decisions when selecting geogrids, configuring structural parameters, and predicting the behavior of the soil–geogrid system under real operating conditions.

Keywords: geogrid, reinforced soil, numerical modeling, Plaxis 2D, short-term strength, long-term strength, geogrid–soil contact zone, elastic and elastoplastic models, reinforced soil retaining walls, road embankments

References

1. 2D Modelling of Geosynthetically Reinforced Piled Embankments: Calibration Methods in PLAXIS 2D & Review of Analytical Guidelines, TRITA-ABE-MBT 2120, 2021, p. 118.
2. Evaluation of the Efficiency of the Standardized Norrland Method, Validerat 20160225, 2016, p. 124.
3. Geogrids in cold climate: Temperature controlled tensile tests & Half-scale installation tests at different temperatures, Trafikverket, 2017, p. 115.
4. ISO 10318-1:2015 — Geosynthetics. Part 1: Terms and definitions.
5. ISO 25619-1:2008 — Geosynthetics. Determination of tensile properties. Part 1: Single tensile test.
6. ISO 13431:1999 — Geotextiles and geotextile-related products. Determination of tensile creep and creep rupture behaviour.
7. EN 13251:2016 — Geotextiles and geotextile-related products. Characteristics required for use in earthworks, foundations and retaining structures.
8. EN 14475:2006 — Execution of special geotechnical works. Reinforced fill.
9. Analysis of Strength Parameters of Polymer Geogrids in Reinforced Soil Structures of Roads and Highways, UDC 625.7/8, DOI: 10.33744/2308-6645-2022-3-53-370-377.

Дата надходження до редакції 26.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 17.02.2026.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ФОРМУВАННЯ РИНКОВИХ ЦІН НА БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ВИРОБИ**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FACTORS ON THE FORMATION OF MARKET PRICES FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.**

Соколова Наталія Михайлівна, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: nata_ns@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-0678-8882>



Стадник Вячеслав Степанович, ТОВ «Максіма капітал», Київ, Україна, e-mail: v.stadnyk@m-capital.com.ua

<https://orcid.org/0000-0002-8989-042X>

Анотація. У статті досліджуються методи визначення ринкових цін на будівельні матеріали та вироби, а також аналізується вплив цих оцінок на ефективне управління ресурсами та фінансової стійкості підприємств, так і для вирішення спорів, пов'язаних з матеріальними збитками, та обґрунтування юридичних претензій. Дослідження підкреслює важливість об'єктивного визначення ринкових цін в юридичному та фінансовому контексті. Розроблено комплексну систему визначення вартості будівельних матеріалів з урахуванням таких ключових факторів, як час закупівлі, розмір партії, відстрочені платежі та коливання ринку. Важливим внеском цього дослідження є його фокус на розрахунку вартості матеріалів на ретроспективні дати, що дозволяє точно оцінити матеріальні втрати та збитки, понесені підприємствами різних форм власності в юридичному контексті. Завдяки інтеграції ринкового аналізу, історичних даних про ціни та вдосконаленого фінансового моделювання, запропонована методологія надає надійні інструменти для документування матеріальних збитків, підтримки справедливих вимог про компенсацію та зміцнення доказової бази для судових проваджень. Ця робота підвищує точність, прозорість та надійність оцінки витрат у спорах, тим самим надаючи важливу підтримку як державним так і приватним експертним установам так і будівельним компаніям, юристам та аудиторам у захисті економічних інтересів та забезпеченні справедливості у вимогах про відшкодування матеріальних збитків.

Ключові слова: Оцінка збитків, комплексна модель, ретроспективна оцінка, ринкова вартість будівельних матеріалів, фактори впливу на ринкову ціну, дата оцінки.

Вступ. Об'єктивне визначення ринкової вартості будівельних матеріалів та виробів на певну дату (дату оцінки) - є фундаментальним компонентом для оцінки матеріальних втрат та підтримки юридичних претензій, пов'язаних з компенсацією матеріальних збитків. Традиційні методи оцінки витрат на практиці часто базуються на статичних цінах, що не враховують динамічний характер

ринкових коливань, часові коливання цін та логістичні аспекти, такі як розмір партії, наявність будівельних матеріалів та продукції на ринку та відстрочені платежі. Таке упущення може призвести до значних неточностей при визначенні ринкових цін на будівельні матеріали та вироби, особливо при ретроспективній оцінці в ситуаціях при вирішенні спорів.

На практиці, судові експерти так і оцінювачі, часто стикаються з проблемами при кількісній оцінці реальної ринкової вартості будівельних матеріалів та виробів у конкретний момент часу, що є критично важливим як для фінансового управління підприємствами, так і для потенційних судових розглядів з визначення збитків. Без надійної методології, яка враховує часові зміни цін та фактори, пов'язані з обсягом партій, експерти ризикують недооцінити або переоцінити матеріальні збитки, що може поставити під загрозу їх правовий статус та фінансову стабільність. Тому для підвищення точності обліку витрат, оцінки збитків та підтримки справедливих юридичних претензій у будівельних спорах необхідно розробити комплексний, математично обґрунтований підхід до аналізу ціноутворення на будівельні матеріали та вироби з урахуванням факторів впливу.

Дослідження основних тенденцій розвитку ринку будівельних матеріалів в умовах воєнного стану в Україні присвячено наукова праця О.В. Романенко, за висновками якого фіксується зростання обсягів державних закупівель та очікується вибухове зростання ринку будівельних матеріалів в Україні після завершення війни.

Аналіз проблем сучасних систем моніторингу цін на матеріальні ресурси у будівництві, такі як CheckPrice та система від ДП «ДерждорНДІ» відображено в науковій статті Б.Б. Попик. Зроблено висновки про важливість інформаційних джерел у забезпеченні актуальної та точної інформації для будівельної галузі, акцентовано важливість підвищення точності зібраної інформації шляхом додаткових механізмів перевірки цін та валідації даних.

Постановка завдання. Розробити комплексну модель для розрахунку ринкової вартості будівельних матеріалів та продукції з урахуванням факторів впливу.

Встановити методологію ретроспективної оцінки вартості будівельних матеріалів для точного визначення втрат і пошкоджень матеріалів, що виникли протягом певних періодів.

Проаналізувати вплив відстрочених платежів та інших логістичних факторів на загальну вартість матеріалів, забезпечуючи точну оцінку.

Визначити практичні інструменти та рекомендації для судових експертів та оцінювачів, юристів для об'єктивної оцінки матеріальних збитків, підтримки справедливих вимог про компенсацію та підвищення прозорості розрахунків ринкової вартості у процесах вирішення спорів.

Викладення основного матеріалу. Нормативно-правовим актом з питань оцінки майна, який окреслює загальні правила проведення оцінки майна та застосування оціночних процедур під час визначення вартості майна є Національний стандарт № 1 «Загальні засади оцінки майна і майнових прав», затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 10.09.2003 № 1440 (далі - Національний стандарт № 1).

Згідно із пунктом 52 Національного стандарту № 1 оцінювач самостійно здійснює пошук інформаційних джерел (за винятком документів, надання яких повинен забезпечити замовник оцінки згідно з договором), їх аналіз та виклад обґрунтованих висновків. При цьому оцінювач повинен проаналізувати всі інформаційні джерела, пов'язані з об'єктом оцінки, тенденції на ринку подібного майна, інформацію про угоди щодо подібного майна, які використовуються у разі застосування порівняльного підходу, та іншу істотну інформацію. У разі неповноти зазначеної інформації або відсутності її взагалі у звіті про оцінку майна зазначається негативний вплив цього факту на результати оцінки.

З огляду на зазначене, судовий експерт як і оцінювач під час здійснення судової експертизи чи проведенні оцінки, має самостійно здійснити пошук інформаційних джерел, які у подальшому використовуватимуться під час оціночних процедур.

Відповідно до пункту 53 Національного стандарту № 1 залежно від обраних методичних підходів та методів оцінки оцінювач (судовий експерт) повинен, зокрема, зібрати та проаналізувати всі істотні відомості про об'єкт оцінки, зокрема вихідні дані про його правовий статус, відомості про склад, технічні та інші характеристики, інформацію про стан ринку стосовно об'єкта оцінки та подібного

майна, відомості про економічні характеристики об'єкта оцінки (прогнозовані та фактичні доходи і витрати від використання об'єкта оцінки, у тому числі від його найбільш ефективного використання та існуючого використання).

Слід звернути увагу, що у випадку проведення ретроспективної оцінки необхідним є наявність достатнього обсягу вихідних даних та іншої інформації, необхідної для проведення оцінки майна. За відсутності такої інформації звіт про оцінку майна (висновок експерта) має містити відповідні пояснення та обґрунтування застереження та припущення щодо використання результатів оцінки.

У контексті оцінки будівельних матеріалів в світовій практиці використовуються кілька основних підходів відповідно до міжнародних стандартів і практик, кожен з яких виправданий своєю ефективністю у забезпеченні точності, справедливості та об'єктивності:

1. Ринковий підхід/Порівняльний підхід. Цей підхід дозволяє визначити вартість будівельних матеріалів на основі ринкових цін, що діють на конкретний момент часу. Він базується на останніх даних про транзакції, цінових пропозиціях постачальників або ринкових дослідженнях. Такий підхід є обґрунтованим, оскільки він відображає фактичну економічну вартість матеріалів з урахуванням поточних економічних умов, динаміки попиту та пропозиції та коливань ринку подібного майна. Він забезпечує реальну основу для оцінки, що є особливо актуальним для юридичних спорів та оцінки збитків.

2. Витратний підхід. За даним підходом розраховується вартість матеріалів на основі виробничих витрат, включаючи витрати на придбання, транспортування, зберігання та обробку в рамках методу прямого відтворення, або ж визначається вартість заміщення пошкоджених або втрачених матеріалів новими, еквівалентними предметами за поточними цінами в рамках методу заміщення.

На практиці також можуть бути використані і комбіновані підходи до оцінки будівельних матеріалів, в які інтегруються елементи з декількох підходів для підвищення точності, особливо коли існують обмеження щодо вихідних даних. Такі методи, наприклад, можуть використовувати як історичні ціни придбання/відтворення матеріалів та ціни пропозицій скориговані з урахуванням інфляції, індексів цін виробників та ринкових тенденцій або інших економічних факторів, для оцінки ринкової вартості на певну дату, в т.ч. й на ретроспективну.

В Україні, склалася широка практика використання порівняльного підходу для оцінки будівельних матеріалів, в тому числі й на ретроспективну оцінку, з використанням цін пропозицій до продажу, інформація про які як правило розміщена на відкритих інтернет – ресурсах спеціалізованих торгових підприємств, інформацію по яким досить легко перевірити на поточний момент. Однак, в межах ретроспективної оцінки, переважно, повна інформація про ринкові ціни подібного майна відсутня і в такому разі слід з обережністю використовувати інформацію, яка може бути отримана відкритих джерел. Таку інформацію слід додатково перевіряти та використовувати комбіновані методи оцінки для перевірки розрахунків та формування остаточних висновків щодо ринкових цін.

Загальний алгоритм визначення ринкової вартості об'єкта оцінки під час застосування порівняльного підходу повинен включати:

1. збір та аналіз всіх істотні відомості про об'єкт оцінки, зокрема вихідні дані про його правовий статус, відомості про склад, технічні та інші характеристики;

2. проведення аналізу зібраної інформації про стан і тенденції ринку подібного майна, станом на дату оцінки;

3. за умов обмеженої або неповної інформації навести письмові застереження щодо можливої неповноти та недостовірності вихідної інформації;

4. навести за текстом звіту або висновку судового експерта критерії, за якими майно може бути віднесено до подібного майна, а також інформацію про продаж або пропозиції подібного майна яка буде використана для порівняння;

5. провести відповідні розрахунки та зробити кінцеві висновки

При зборі та аналізі інформації, що має значення для оцінки будівельних матеріалів, слід ретельно враховувати наступні фактори, щоб забезпечити всебічну та об'єктивну оцінку:

1. Правовий статус та право власності;

2. Склад та технічні характеристики;
3. Інформацію про кількість та розмір партії;
4. Ринкові умови (інформація про ціни) включаючи ціни в залежності від умов фінансування, умов поставок, розміру партії;
5. Історичні тенденції цін: дані, що показують, як ціни змінювалися з часом, для аналізу ринкових тенденцій;
6. Динаміка попиту та пропозиції: розуміння ринкового попиту на конкретні матеріали, сезонність та інші відповідні економічні фактори;
7. Технічні стандарти та сертифікати.

Аналізуючи дані фактори, можна прийти до висновку, що при коректній ідентифікації об'єкта оцінки відносно правового статусу, його складу, кількості (розміру партії) технічних характеристик, умов фінансування, важливу роль в подальших розрахунках грають роль ринкові умови, а саме ринкові ціни на подібне майно.

Саме, аналіз та коректне відображення суттєвих розбіжностей між кожним об'єктом порівняння та об'єктом оцінки за ринковими умовами дасть можливість виконавцю оцінки обґрунтувати та застосувати в розрахунках числові значення коригувань.

При проведенні оцінки ці фактори слід інтегрувати у фінансові моделі або симуляції, що відображають вплив різних ринкових умов на ринкову вартість матеріалів.

$$MV_c = (P_b \times S) \times (1 + r)^t \times \left(1 + \frac{C_d}{100}\right) \times \left(1 - \frac{D}{100}\right), \quad (1)$$

де: MV_c - ринкова вартість будівельних матеріалів.

P_b - базова ціна за одиницю матеріалу.

S - розмір партії або кількість.

r - ефективна ставка або вартість відстрочки платежу (виражена у вигляді десяткового числа).

t - термін відстрочки платежу (у місяцях).

C_d - додатковий відсоток вартості доставки (виражений у відсотках від базової ціни).

D - знижки, доступні при купівлі партії або достроковій оплаті (якщо такі є) у відсотковому виразі.

Комплексна формула для оцінки вартості матеріалів на дату оцінки за типових умов фінансування, враховуючи базову ціну, що визначена в попередньому періоді, в тому числі як фактична вартість придбання так і вартість пропозиції, з урахуванням змін індексу цін виробників (PPI) і коливань обмінного курсу буде мати наступний вигляд:

$$MV_c = P_b \times S \times \left(\frac{PPI_v}{PPI_b}\right) \times \left(\frac{ER_v}{ER_b}\right) \times \left(1 + \frac{C_d}{100}\right) \times \left(1 - \frac{D}{100}\right), \quad (2)$$

де: MV_c - ринкова вартість будівельних матеріалів.

P_b - базова ціна за одиницю матеріалу.

S - розмір партії або кількість об'єкта оцінки.

PPI_b - індекс цін виробників промислової продукції на базову дату.

PPI_v - індекс цін виробників промислової продукції на дату оцінки.

ER_b - обмінний курс (курс валюти) на базову дату.

ER_v - обмінний курс на дату оцінки.

C_d - додатковий відсоток вартості доставки (виражений у відсотках від базової ціни).

D - знижки, доступні при купівлі оптової партії або достроковій оплаті (якщо такі є) у відсотковому виразі.

Дана формула дає змогу скоригувати базову ціну об'єкта оцінки з урахуванням інфляції або дефляції, що відображається у зміні індексу цін виробників відповідної промислової продукції країни походження будівельних матеріалів та урахуванням коливань валютного курсу.

Неоднорідний характер ринку багатьох матеріалів означає, що часто неможливо знайти ринкові докази транзакцій, або ж пропозицій до продажу що стосуються ідентичних або подібних об'єктів на ретроспективну дату. Навіть у випадках, коли ринковий підхід не використовується, слід максимально використовувати спостережувані вхідні дані при застосуванні інших підходів (наприклад, ринковий аналіз історичних даних для отримання контекстуальної інформації про те, як ці фактори впливали на ціни в минулому та динаміка попиту та пропозиції на поточний момент).

Така порівнянна ринкова інформація може не стосуватися ідентичного або істотно подібного активу, і в такому разі оцінювач повинен провести порівняльний аналіз якісних та кількісних подібностей та відмінностей між порівнянними активами та об'єктом оцінки. В такому разі можливо використовувати ринкові мультиплікатори для певного виду будівельних матеріалів або їх групи, отриманих на основі набору порівнянних активів, кожен з яких може мати різні мультиплікатори.

Застосування таких мультиплікаторів, які враховують ціни в минулому і на поточний момент з урахуванням динаміки та пропозиції дасть змогу використати стимуляційні моделі для подальшого судження з урахуванням якісних та кількісних факторів та формування остаточних висновків відносно ринкової вартості в ретроспективі.

Критичним елементом для підтвердження надійності запропонованої методології оцінки є включення аналізу чутливості. Цей аналітичний інструмент дозволяє дослідникам і практикам дослідити, як варіації ключових параметрів впливають на кінцеві результати оцінки. Зокрема, зміни валютних курсів, розміру партій, індексів цін виробників, знижок і витрат на доставку можуть суттєво вплинути на ринкову вартість будівельні матеріали та виробу.

Таблиця 1 – Аналіз чутливості – ключові фактори

Table 1 – Sensitivity analysis – key factors

Фактор	Вплив на оцінку	Результат чутливості
Валютний курс (ER_b / ER_v)	Безпосередньо впливає на конвертовану базову ціну імпортованих матеріалів.	Навіть невеликі коливання можуть істотно змінити ретроспективні оцінки в транскордонних контекстах, тому дуже важливо проводити розрахунки в валютній одиниці, в якій матеріали фактично торгуються або імпортуються в країну (наприклад, євро або долар США), оскільки це забезпечує узгодженість, точність і порівнянність результатів оцінки.
Індекс цін виробника (PPI_b / PPI_v)	Відображає тенденції інфляції/дефляції в промисловому виробництві.	Висока чутливість: результати оцінки значно варіюються залежно від змін індексів цін виробників, тому надзвичайно важливо застосовувати індекси, що відповідають відповідним рынкам (наприклад, індекс цін виробників Євросоюзу, індекс цін виробників Китаю або індекс цін виробників США), щоб забезпечити точне відображення ретроспективних оцінок з урахуванням регіональних економічних умов та динаміки ринку.
Знижки (D)	Знижує вартість при закупівлі оптових/масових партій або достроковій оплаті.	Помірна чутливість: знижки можуть компенсувати інфляційні ефекти, але залежать від політики постачальника.
Вартість доставки (C_d)	Це додає відсоткові накладні витрати до базової ціни.	Низька або помірна чутливість: більш актуальна для імпортних або міжміських закупівель.

Систематично коригуючи ці змінні в моделі оцінки, аналіз чутливості дає уявлення про відносну вагу кожного фактора. Наприклад, коливання валютного курсу можуть непропорційно впливати на імпортовані матеріали, тоді як коригування розміру партій може виявити економії на масштабі або підкреслити неефективність стратегій закупівель. Аналогічно, індекси цін виробників відображають макроекономічні умови, такі як інфляція чи дефляція, які безпосередньо впливають на ретроспективні оцінки.

Проведення аналізу чутливості не лише підвищує прозорість, а й забезпечує осіб, які приймають рішення, чіткіше розуміння потенційних ризиків і невизначеностей. Вона дозволяє судовим експертам, оцінювачам і юридичним фахівцям визначити найвпливовіші змінні та передбачити, як волатильність ринку може вплинути на визначення компенсації та зміцнення доказової бази для судових проваджень або вирішення спорів.

Незважаючи на комплексність запропонованої методології, необхідно визнати кілька потенційних обмежень для практичного застосування. Однією з основних проблем є обмежена доступність історичних ринкових даних щодо ринку подібного майна, особливо в контекстах, де надійні транзакційні записи або пропозиції до продажу є обмеженими або неповними. Це обмеження може знизити точність ретроспективних оцінок і вимагає ретельної інтерпретації результатів, оскільки неповні набори даних можуть спричинити упередженість або невизначеність у кінцевих висновках.

Іншим важливим обмеженням є неоднорідність будівельних матеріалів у різних регіонах та у різних постачальників. Відмінності в технічних характеристиках, стандартах якості та структурах ланцюгів постачання ускладнюють пряму порівняльність і можуть перешкоджати встановленню єдиних еталонних показників. Крім того, відсутність ідентичних об'єктів порівняння часто змушує виконавців покладатися на опосередковані дані, які, хоч і є корисними, але можуть не повністю відображати нюанси конкретних матеріалів або ринкових умов.

Майбутні дослідження повинні бути спрямовані на подолання цих обмежень шляхом інтеграції передових аналітичних інструментів та інноваційних джерел даних. Одним із перспективних напрямків є застосування прогностичних моделей на основі штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання для відновлення відсутніх історичних даних, виявлення прихованих закономірностей у динаміці ринку та моделювання траєкторій цін за різних економічних умов. Такі підходи можуть значно підвищити надійність ретроспективних оцінок.

Крім того, розробка відкритих баз даних для будівельних матеріалів підвищила б прозорість та доступність даних, надаючи більш міцну доказову базу для практичного вирішення спорів. Майбутні дослідження також могли б вивчити можливість інтеграції реєстрів на основі блокчейну для забезпечення автентичності та простежуваності записів про транзакції, тим самим зменшуючи ризики, пов'язані з неповними або ненадійними наборами даних.

Висновки

Це дослідження підкреслює важливу роль об'єктивної оцінки будівельних матеріалів та продукції на ретроспективну дату, особливо в контексті управління ресурсами, фінансової стабільності та вирішення юридичних спорів. Розробивши надійну систему, що враховує такі фактори, як час закупівлі, розмір партії, умови фінансування та коливання ринку, запропоновано детальний підхід до визначення ринкової вартості на будівельні матеріали. Зокрема, включення ретроспективних розрахунків даних дозволяє точно оцінити матеріальні втрати та збитки, підвищуючи здатність різних підприємств ефективно управляти своїми економічними інтересами.

Дана методологія, заснована на всебічному аналізі ринку, історичних даних про ціни та складних фінансових моделях, пропонує інструменти для документування матеріальних збитків. Це зміцнює доказову базу для юридичних позовів, забезпечуючи справедливую компенсацію та сприяючи прозорості процесів вирішення спорів. Зрештою, це дослідження підвищує надійність та точність оцінки витрат у всій галузі, тим самим підтримуючи будівельні компанії, юристів та аудиторів у їхніх зусиллях щодо забезпечення економічної справедливості та стабільності. Висновки та інструменти, розроблені в ході цього дослідження, мають потенціал для оптимізації практик у оціночній та судовій експертній галузі, сприяючи більшій справедливості та ефективності в управлінні витратами та судовому розгляді.

Крім того, включення аналізу чутливості до системи оцінки демонструє надійність запропонованої моделі. Аналізуючи вплив коливань обмінних курсів, розмірів партій, індексів цін виробників, знижок та витрат на доставку на кінцеві результати оцінки, аналіз чутливості дозволяє глибше зрозуміти відносну важливість кожного з цих факторів. Такий підхід підвищує прозорість,

допомагає виявити потенційні ризики та гарантує надійність результатів оцінки в різних ринкових сценаріях.

Проте слід визнати певні обмеження, зокрема обмежену доступність історичних ринкових даних для подібних об'єктів нерухомості. У багатьох випадках надійні записи про угоди або пропозиції про продаж є неповними або недоступними, що може знизити точність ретроспективних оцінок і вимагати обережної інтерпретації результатів. Це обмеження підкреслює важливість розробки вдосконалених механізмів збору даних, інтеграції прогнозової аналітики та сприяння створенню баз даних з відкритим доступом для зміцнення доказової бази для майбутніх оцінок.

В цілому, висновки цього дослідження підкреслюють не тільки методологічний внесок, але й необхідність постійного вдосконалення. Майбутні дослідження повинні бути спрямовані на розширення аналізу чутливості, усунення обмежень даних та інтеграцію прогнозних моделей на основі штучного інтелекту для відновлення відсутньої історичної інформації.

Перелік посилань.

1. Романенко О.В. Розвиток ринку будівельних матеріалів України в умовах воєнного стану. *Електронний журнал «Ефективна економіка»*. 2024. № 3. <https://nauka.com.ua/index.php/ee/issue/view/137>. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.3.46>.
2. Попик Б.Б. Сучасні системи моніторингу цін на матеріальні ресурси у будівництві: принципи роботи та виклики. *Електронний журнал «Економіка та суспільство»* № 64 (2024). <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/issue/view/64>. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-33>
3. О.В. Савченко, М.М. Греков. Ціни та процес ціноутворення: теоретичний аспект. № 2 (2024): *Development Service Industry Management*. <https://dsim.khmn.edu.ua/index.php/dsim/article/view/129>. [https://doi.org/10.31891/dsim-2024-6\(11\)](https://doi.org/10.31891/dsim-2024-6(11)).
4. Закон України «Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність в Україні», № 2658-III від 12.07.2001. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2658-14#Text>. (Дата звернення – 18.10.2025).
5. Національний стандарт №1 «Основні засади оцінки майна та майнових прав», затверджений Постановою Кабінету міністрів України №1440 від 10.09.2003 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-%D0%BF#Text>. (дата звернення 18.10.2025).
6. Методика визначення шкоди та обсягу збитків, завданих підприємствам, установам та організаціям усіх форм власності внаслідок знищення та пошкодження їх майна у зв'язку із збройною агресією російської федерації, а також упущеної вигоди від неможливості чи перешкод у провадженні господарської діяльності, Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 02 грудня 2022 р. за № 1522/38858. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1522-22#Text>. (дата звернення 18.10.2025).
7. International Valuation Standards, Effective 31 January 2025/ <https://ivsc.org/standards/> (дата звернення 18.10.2025).
8. The Guide to Damages in International Arbitration - Sixth Edition, December 19, 2024. <https://globalarbitrationreview.com/guide/the-guide-damages-in-international-arbitration/6th-edition>. (Дата звернення 18.10.2025).
9. Лист ФДМУ №10-58-10866 від 15.08.2022. https://uto.com.ua/wp-content/uploads/2022/08/fdmu_do_uto_15_08_2022_018.pdf (дата звернення - 19.10.2025)

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FACTORS ON THE FORMATION OF MARKET PRICES FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.

Sokolova Natalia M., PhD, associate professor, National Transport University, associate professor department of transport construction and property management, e-mail: nata_ns@ukr.net, tel. +380675872662, Ukraine, 01010, Kyiv

Stadnyk Viacheslav S., v.stadnyk@m-capital.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8989-042X>, MAXIMA CAPITAL LLC, Kyiv, Ukraine

Summary. The article examines methods for determining market prices for construction materials and products, and also analyzes the impact of these estimates on the effective management of resources and financial stability of enterprises, as well as for resolving disputes related to material damage and substantiating legal claims. The study highlights the importance of objectively determining market prices in a legal and financial context. A comprehensive system for determining the cost of construction materials has been developed, taking into account key factors such as procurement time, batch size, deferred payments and market fluctuations. An important contribution of this study is its focus on calculating the cost of materials at retrospective dates, which allows for an accurate assessment of material losses and damages incurred by enterprises of various forms of ownership in a legal context. By integrating market analysis, historical price data, and advanced financial modeling, the proposed methodology provides robust tools for documenting material damages, supporting fair compensation claims, and strengthening the evidentiary base for litigation. This work increases the accuracy, transparency and reliability of cost estimates in disputes, thereby providing important support to both public and private expert institutions as well as construction companies, lawyers and auditors in protecting economic interests and ensuring fairness in claims for compensation for material damage.

Keywords: Loss assessment, complex model, retrospective assessment, market value of building materials, factors influencing market price, assessment date.

References

1. Romanenko, O.V. (2024). Development of the construction materials market in Ukraine under martial law. *Electronic Journal Effective Economy*, (3). Retrieved from <https://nayka.com.ua/index.php/ee/issue/view/137>. DOI: 10.32702/2307-2105.2024.3.46. [in Ukrainian]
2. Popyk, B.B. (2024). Modern systems for monitoring prices for material resources in construction: principles of operation and challenges. *Electronic Journal Economics and Society*, (64). <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/issue/view/64>. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-64-33. [in Ukrainian]
3. Savchenko, O.V., & Grekov, M.M. (2024). Prices and the pricing process: theoretical aspects. *Development Service Industry Management*, (2). <https://dsim.khmn.edu.ua/index.php/dsim/article/view/129>. DOI: 10.31891/dsim-2024-6(11). [in Ukrainian]
4. Law of Ukraine “On the Valuation of Property, Property Rights and Professional Valuation Activities in Ukraine”, No. 2658-III of 12 July 2001. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2658-14#Text>. (Accessed: 18 October 2025). [in Ukrainian]
5. National Standard No. 1 “Basic Principles of Property and Property Rights Valuation”, approved by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1440 of 10 September 2003. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-п#Text>. (Accessed: 18 October 2025). [in Ukrainian]
6. Methodology for Determining Damage and Losses caused to enterprises, institutions and organisations of all forms of ownership due to destruction or damage to property as a result of armed aggression by the Russian Federation, and lost profits due to inability or obstacles to conducting economic activity. Registered with the Ministry of Justice of Ukraine on 2 December 2022, No. 1522/38858. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1522-22#Text>. (Accessed: 18 October 2025). [in Ukrainian]
7. International Valuation Standards (Effective 31 January 2025). <https://ivsc.org/standards/>. (Accessed: 18 October 2025).
8. The Guide to Damages in International Arbitration (6th ed., 19 December 2024). <https://globalarbitrationreview.com/guide/the-guide-damages-in-international-arbitration/6th-edition>. (Accessed: 18 October 2025).
9. Letter from the State Property Fund of Ukraine, No. 10-58-10866 of 15 August 2022. https://uto.com.ua/wp-content/uploads/2022/08/fdmu_do_uto_15_08_2022_018.pdf. (Accessed: 19 October 2025). [in Ukrainian]

Дата надходження до редакції 10.02.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 02.03.2026.

УДК 625.7/.8
UDC 625.7/.8

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-332-340

**ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДОРОЖНЬОГО
БІТУМУ, МОДИФІКОВАНОГО ДОБАВКАМИ СЕРІЇ «АДБІТ»**

**COMPARATIVE RESEARCH OF THE ADHESIVE PROPERTIES OF ROAD BITUMEN
MODIFIED WITH ADDITIVES OF THE “ADBIT” SERIES**



Vladyslav Teterya, PhD student of Department of Highway Construction and Maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vl1470@ukr.net, тел. +380976824338.
<https://orcid.org/0000-0001-8997-7616>



Kateryna Tsyrkunova, Candidate of Technical Sciences, Senior Specialist State Enterprise “Projects Management Unit for Restoration”, Kyiv, Ukraine, e-mail: ktsyrkunova@yahoo.com, тел. +380973508475.



Valeriy Zhdaniuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vkzhdanyuk@gmail.com, тел. +380679632807.
<https://orcid.org/0000-0003-0420-7036>

Abstract: The paper presents the results of a comparative study of the influence of the cationic surface-active additive (surfactant) Adbit-R and the energy-saving additive Adbit-N on the adhesive properties of petroleum road bitumen in terms of adhesion of bitumen films to the surface of granite crushed stone grains and glass plates and the adhesion activity index. It is shown that among the studied additives, the surfactant Adbit-R provides road bitumen with the highest values of the studied indicators. In terms of adhesion of bitumen films to the surface of glass plates, the additive Adbit-R exceeds the energy-saving additive Adbit-N (at its concentration in the bitumen composition of 0.4% and 0.5% by mass), respectively, by 2.5 times and 2.0 times. By adding 0.4% and 0.5% of the energy-saving additive Adbit-N to the base bitumen, its adhesion to the surface of glass plates increases, respectively, by 3.0 and 3.7 times, compared to the original bitumen without the additive. It was found that the adhesion activity of bitumen increases with increasing concentration of the energy-saving additive Adbit-N in its composition.

Keywords: highway (motor road), road pavement, surface course, durability, asphalt concrete, long-term water resistance, road bitumen, adhesion, surface properties, surfactant, energy-saving additive, adhesion activity, adhesion index of bitumen to a mineral surface.

Introduction. One of the primary modes of failure in the asphalt concrete layer of highway pavements is the detachment of individual aggregate particles from the surface, which, during continued service, results in gradual wear and the formation of localized potholes. This type of failure is most pronounced during periods of significant moisture penetration and water saturation of the pavement due to precipitation. The process of pothole formation in asphalt concrete pavements is more pronounced on highways with high traffic intensity and speed, particularly during periods of frequent alternating service temperatures. The specified types of asphalt concrete pavement distress significantly reduce the overall durability of the road structure.

The primary cause of pothole formation in the pavement layer is the insufficient resistance of bitumen films on the surface of mineral aggregate particles to the stripping action of water. The intensive reduction in the adhesion strength of bitumen films to the mineral surface in the presence of water is attributed both to the relatively low surface activity of the mineral material and to the inadequate adhesive properties of the organic binder. Therefore, to improve the long-term water resistance and frost resistance of asphalt concrete, various technological methods are commonly employed, aimed at enhancing both the surface activity of the mineral components of the asphalt mixture and the adhesive activity of road bitumen.

Literature review. In the technology of asphalt concrete mixture production, there are three main approaches to improving the long-term water resistance of asphalt concrete. The first is aimed at increasing the surface activity of the mineral components of asphalt concrete (Kosmin, 1980; Kim & Tsoi, 1989; Kovalev, 2002). The second involves regulating the molecular–surface properties of road bitumen as a component of asphalt concrete (Kuchma, 1980; Zinchenko, 1974; Ageieva & Tytar, 1985). The third consists in simultaneously enhancing both the molecular–surface properties of bitumen and the surface activity of the mineral constituents (Ageieva, Fomenko, & Poyasnyk, 1989; Shrestha, 2004).

Numerous studies have established that, in order to improve the adhesion strength between bitumen and the surface of mineral aggregates in asphalt concrete, the aggregate surface is activated by various methods (physicochemical, mechanical, thermal, electrophysical, etc.). In asphalt concrete technology, the most widely applied practical method is the activation, or hydrophobization, of mineral filler surfaces (Kosmin, 1973) during their production, most often by grinding. For surface activation of mineral filler, different organic substances are traditionally used, characterized by good compatibility with road bitumen as the binder component of asphalt concrete. Petroleum pitch, fuel oil, mixtures of pitch and fuel oil, polymers or polymer production residues, and surfactants (either individually or in combination with other organic substances) are commonly employed for this purpose. Another known method involves activating the mineral fraction of asphalt concrete mixtures derived from acidic rocks by using aqueous suspensions of inorganic activators such as magnesia or hydrated lime, and cement. These activators contain multivalent cations (Al^{3+} , Fe^{3+}), which saturate the surface of sand particles, thereby reducing or even reversing their surface charge. To enhance the long-term water resistance of asphalt concrete, it has also been proposed to activate the mineral fraction of the mixture with aqueous surfactant solutions directly in the asphalt mixer prior to combining with bitumen (Poyasnyk, 1996). Studies (Shrestha, 2004) have shown that activation of mineral materials from acidic rocks with aqueous solutions of ferric chloride increases the adhesion index of bitumen to their surface and, consequently, improves the long-term water resistance and frost resistance of asphalt concrete. Based on investigations of the chemical composition and electro-surface properties of stone materials of different origins (Zhdanyuk & Kondrashchenko, 2000; Zhdaniuk, Shilenko, & Schevchenko, 2000), it was concluded that sufficiently high resistance of structured bitumen films to the stripping action of water, as well as high long-term water resistance of asphalt concrete, can be achieved even without prior surface activation. For this purpose, it is recommended to use mineral components from acidic rocks with the highest possible combined content of $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ and/or with the largest possible surface area exhibiting predominantly positive or electro-neutral surface charge.

Research and practical experience have confirmed that the enhancement of the adhesive activity of road bitumen with respect to the surface of mineral aggregates in asphalt concrete can be achieved through direct modification, both at the stage of bitumen preparation and during its use in asphalt concrete mixture production. Studies (Novitskaya, Izmailova, & Matskevich, 1985; Kovalev, 1993) have focused on regulating the adhesive activity and properties of road bitumen during its preparation by means of petroleum feedstock

oxidation technology. To improve the adhesive and physico-mechanical properties of oxidized road bitumen, it has been proposed to introduce additives of aromatic hydrocarbons of various origins into the oxidized petroleum pitch (Chalokhyan & Volodin, 1980; Farberov, Lavrukhin, & Mikrin, 1983), to intensify the oxidation process through ultrasonic activation of the feedstock, and to employ ultraviolet radiation for the activation of air supplied to the oxidation apparatus, among other methods.

To improve the adhesive properties of viscous road bitumen during asphalt concrete mixture production, it has been proposed to apply foaming techniques or heating using microwave (UHF) energy, as well as to perform ultrasonic activation of hot bitumen at the inlet to the asphalt mixer. These technological measures contribute to enhancing the adhesion of road bitumen to the surface of the mineral components of asphalt concrete (Vendrikhovski, 1995; Zinchenko, 1974).

At present, in Ukraine, the most widely applied technology for enhancing the adhesive activity of road bitumen involves the use of cationic surfactant additives (Kuchma & Babinets, 1975; Fomenko & Holovko, 1980; Kudriavtseva-Valdes, 2010). The addition of surfactants directly into bitumen increases the resistance of bitumen films to the stripping action of water on the surface of mineral aggregates in asphalt concrete (Kyrylova & Chetaiev, 1973). The improvement of bitumen adhesion to the surface of mineral aggregates through the incorporation of various adhesion additives has been established in studies (Solomentsev, Krut, & Malyar, 1999; Pechenyi, 1967; Shemonayeva, Gokhman, Pankov, & Latysheva, 1986). It has been established that the optimal concentration of surfactants in road bitumen depends not only on the efficiency of the surfactant itself and the initial adhesive activity of the base bitumen, but also on the chemical and mineralogical composition and surface activity of the mineral material in contact with the bitumen. When selecting surfactants to improve the long-term water resistance and frost resistance of asphalt concrete, process engineers traditionally perform comparative evaluations of their ability to increase the adhesion index of bitumen films to mineral surfaces (Korolov, 1975; Holovko, 1978). Currently, most manufacturers of both adhesion-promoting and energy-saving additives declare their capacity to improve the adhesion of bitumen to mineral aggregates in asphalt concrete, as well as their contribution to energy efficiency. However, it is well known that, according to their primary functional purpose, surfactants and energy-saving additives belong to different classes of modifying agents. Evidently, they differ in composition, structure, and properties, and therefore should influence the enhancement of the adhesive activity of road bitumen in different ways.

The aim of this study is a comparative research of the effectiveness of cationic surfactant additives and energy-saving additives of the Adbit series in enhancing the adhesive properties of road bitumen.

Materials and methods. For the experiments, viscous petroleum road bitumen grade BND 70/100 was selected, as it is the most widely used in the production of hot asphalt concrete mixtures in Ukraine. The main physical and mechanical properties of the studied bitumen are presented in Table 1. As modifying additives, an adhesion-promoting amine-containing surfactant Adbit-R and an energy-saving additive Adbit-N, both produced by the company BARKOR, were used. According to the manufacturer, the adhesion additive Adbit-R is characterized by the following properties: density — 1.01 g/cm³, conditional viscosity measured with a VZ-246 viscometer (orifice diameter 6 mm) at 20 °C — 240 s, amine number — 42.2 mg HCl per 1 g of product, solidification temperature — 0 °C. The energy-saving additive Adbit-N has the following properties: density — 0.96 g/cm³, conditional viscosity measured with a VZ-246 viscometer (orifice diameter 6 mm) at 20 °C — 150 s, amine number — 26.2 mg HCl per 1 g of product, solidification temperature — -4 °C.

For modification of the base bitumen, the content of the adhesion additive Adbit-R was set at 0.3%, while the energy-saving additive Adbit-N was used at 0.4% and 0.5% by weight of bitumen, in accordance with the manufacturer's recommendations. Modification was carried out by adding the investigated additives to the bitumen at a temperature of 150 °C under continuous stirring. The adhesive properties of the investigated base bitumen and the bitumen modified with the studied additives were evaluated by the experimentally determined adhesion index of the bitumen film to the surface of granite aggregate particles according to method (DSTU, 2018), and to the surface of glass plates under the stripping action of water according to method (DSTU, 2021). The adhesion activity index of the bitumen containing the surfactant additive Adbit-R and the energy-saving additive Adbit-N was determined by a calculation method as the ratio of the increase in the

adhesion index of bitumen to the surface of glass plates to the content of the modifying additive in its composition, in accordance with (VBN, 2003).

Results and discussion. Based on the results of comparative studies of the principal properties of the base bitumen and the bitumen modified with the investigated additives, it can be stated that the needle penetration depth is a moderately sensitive parameter to the content of both energy-saving and adhesion additives in the bitumen (increasing by 13.7 % with the addition of 0.4 % and by 16.4 % with the addition of 0.5 % of Adbit-N, and by 6.9 % with the addition of 0.3 % of Adbit-R). The softening point is also only slightly affected by the content of modifying additives in the bitumen. Its reduction is less than 1 °C, which does not exceed the permissible limits of measurement reproducibility.

The results of the study on the effect of modifying additives in bitumen on its adhesion index to the surface of granite aggregate particles according to method (DSTU, 2018), as well as to the surface of glass plates according to method (DSTU, 2021), are presented in Table 1. From the representative samples of granite aggregate shown in Fig. 1 (photographic documentation taken after determining the adhesion index of the investigated bitumen to its surface), it is evident that the studied additives improve the resistance of bitumen films to the stripping action of water. It was established that the largest surface area remaining uncovered by the bitumen film after boiling in water is characteristic of the base bitumen without modifying additives. Analysis of the results presented in Table 1 indicates that the addition of 0.3% of the adhesion additive Adbit-R to the base bitumen increases its adhesion index to granite aggregate particles by 80%. In the case of incorporating 0.4% of the energy-saving additive Adbit-N into the base bitumen, the adhesion index of the bitumen film increases significantly less—by 28%. Increasing the content of Adbit-N to 0.5% in the base bitumen results in a 48% increase in the adhesion index of bitumen films. Evidently, the lower adhesion index of bitumen films modified with the energy-saving additive Adbit-N to granite aggregate particles is caused by the lower amine content in its composition, as indicated by the 38% lower amine number compared to the adhesion additive Adbit-R.

Table 1 – Properties of petroleum road bitumen

Таблиця 1 – Властивості нафтового дорожнього бітуму

No	Name and content of additive in bitumen	Properties of bitumen					
		Penetration at 25 °C, mm ⁻¹	Softening point, °C	Ductility at 25 °C, cm	Bitumen adhesion index to the surface of crushed stone particles, points	Bitumen adhesion index to the surface of glass plates, %	Adhesion activity index
1	Base bitumen BND 70/100	73	47.0	> 100	2.5	12.3	-
2	Bitumen BND 70/100+0.4 % Adbit-N	83	46.5	> 100	3.2	37.2	62.3
3	Bitumen BND 70/100+0.5 % Adbit-N	85	46.0	> 100	3.7	46.0	67.4
4	Bitumen BND 70/100+0.3 % Adbit-R	78	46.0	> 100	4.5	94.0	272.3



Figure 1 – General view of representative samples of granite crushed stone after testing: 1 (base bitumen BND 70/100), 2 (bitumen with 0.3 % Adbit-R), 3 (bitumen with 0.4 % Adbit-N), 4 (bitumen with 0.5 % Adbit-N)

Рисунок 1 – Загальний вигляд репрезентативних зразків гранітного щебеню після випробувань: 1 (бітум на основі БНД 70/100), 2 (бітум з 0,3% Adbit-R), 3 (бітум з 0,4% Adbit-N), 4 (бітум з 0,5% Adbit- N)

The general appearance of the samples after determining the adhesion index of the investigated bitumen films to the surface of glass plates is shown in Fig. 2.

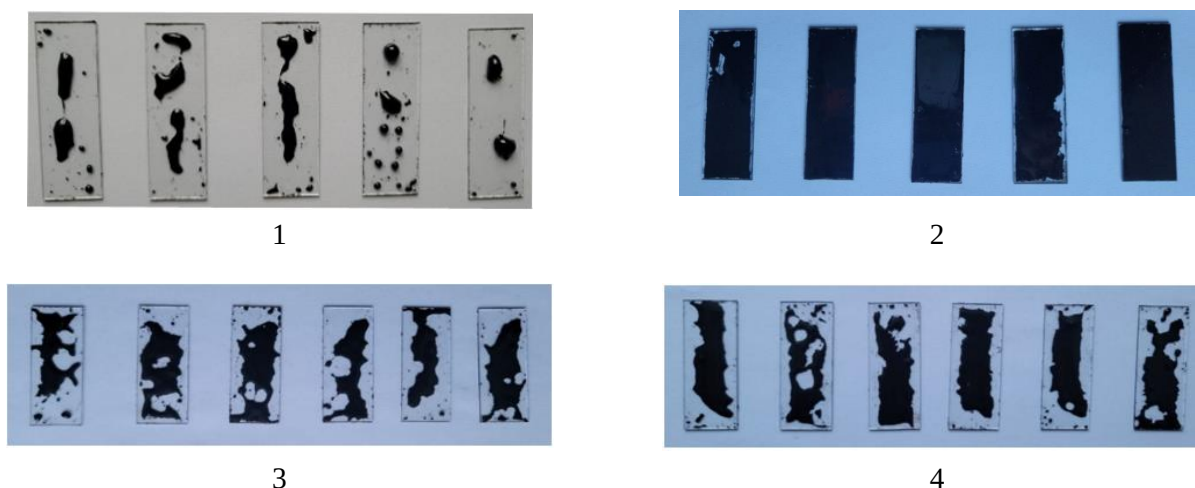


Figure 2 – General view of samples after testing: 1 (base bitumen BND 70/100), 2 (bitumen with 0.3 % Adbit-R), 3 (bitumen with 0.4 % Adbit-N), 4 (bitumen with 0.5 % Adbit-N)

Рисунок 2 – Загальний вигляд зразків після випробувань: 1 (базовий бітум BND 70/100), 2 (бітум з 0,3% Adbit-R), 3 (бітум з 0,4% Adbit-N), 4 (бітум з 0,5% Adbit-N)

From the experimental results presented in Table 1 and Fig. 2, it is evident that the addition of the surfactant Adbit-R and the energy-saving additive Adbit-N to bitumen grade BND 70/100 increases the resistance of its films to the stripping action of water on the surface of glass plates, which is consistent with the results of determining the adhesion index of bitumen modified with the investigated additives to granite aggregate particles. The base bitumen exhibits the lowest adhesion index to glass plate surfaces (average value only 12.3%). The addition of 0.3% of the cationic surfactant Adbit-R to the base bitumen leads to the greatest increase in adhesion to glass plates (94%). Incorporation of the energy-saving additive Adbit-N results in a significantly smaller increase in adhesion compared to Adbit-R. At 0.4% content of Adbit-N, the adhesion

index rises to 37.2%, while increasing its content to 0.5% further raises the adhesion index to 46%. Analysis of the experimental data shows that bitumen with 0.3% Adbit-R, 0.4% Adbit-N, and 0.5% Adbit-N exceed the base bitumen without additives in adhesion to glass plates by factors of 7.6, 3.0, and 3.7, respectively. At the same time, bitumen with Adbit-R surpasses bitumen with 0.4% and 0.5% Adbit-N in adhesion to glass plates by factors of 2.5 and 2.0, respectively. Comparative analysis of the bitumen modified with the investigated additives by the adhesion activity index (Table 1) indicates that the highest value is characteristic of bitumen with the cationic surfactant Adbit-R, while the lowest value corresponds to bitumen with 0.4% Adbit-N. The data in Table 1 also show that with increasing content of Adbit-N in the base bitumen, its adhesion activity index rises. According to this index, bitumen with Adbit-R exceeds bitumen with 0.4% and 0.5% Adbit-N by factors of 4.4 and 4.0, respectively. Meanwhile, bitumen with 0.5% Adbit-N exceeds that with 0.4% Adbit-N by only 8.2%.

Conclusions. It has been experimentally confirmed that the addition of the surfactant Adbit-R to petroleum road bitumen, which by its primary functional purpose is intended to enhance its adhesive properties, significantly increases the adhesion index of bitumen films to the surface of granite aggregate particles and glass plates, as well as the adhesion activity index, which are the main standardized criteria of its effectiveness. It has been established that the addition of the energy-saving additive Adbit-N to petroleum road bitumen, which by its primary functional purpose is intended to reduce energy consumption during the preparation of asphalt concrete mixtures and improve their compactability, also contributes to a certain increase in its adhesive properties. It has been shown that with increasing concentration of the energy-saving additive in bitumen, its adhesive properties improve slightly. However, in terms of the adhesion activity index, bitumen with 0.5% Adbit-N is significantly inferior to bitumen with 0.3% of the cationic surfactant Adbit-R (the adhesion activity index is four times lower). Evidently, the lower level of adhesion activity of Adbit-N compared to Adbit-R may be compensated by the simultaneous addition of both investigated additives to bitumen. In the case of combined addition, the concentration of Adbit-R should be determined taking into account the adhesion index of the base bitumen containing Adbit-N with respect to mineral surfaces. The cationic surfactant may not be required if the base bitumen with the energy-saving additive already exhibits high initial adhesion activity and if the indicators of long-term water resistance and frost resistance of asphalt concrete produced on its basis meet the requirements of current national standards.

References

1. Ageieva, O. M., & Tytar, V. S. (1985). Expansion of surfactant nomenclature to improve asphalt concrete mixture quality. *Automobile Roads and Road Construction*, (37), 30–33. [in Ukrainian]
2. Ageieva, O. M., Fomenko, G. R., & Poyasnyk, H. V. (1989). Modification of mineral material surfaces in asphalt concrete mixtures using various surfactants to optimize their properties. *Automobile Roads and Road Construction*, (45), 44–48. [in Ukrainian]
3. Chalokhyan, S. I., & Volodin, V. I. (1980). Binder from joint oxidation of tar and gudron. *Automobile Roads*, (10), 26–27. [in Ukrainian]
4. DSTU 8787:2018. (2018). *Bitumen and bituminous binders. Method for determining adhesion to crushed stone*. Kyiv: State Enterprise “UkrNDNC”. [in Ukrainian]
5. DSTU 9169:2021. (2021). *Bitumen and bituminous binders. Determination of adhesion to mineral material*. Kyiv: State Enterprise “UkrNDNC”. [in Ukrainian]
6. Fomenko, G. R., & Holovko, V. A. (1980). Improvement of asphalt concrete properties using BP-3 surfactant. *Automobile Roads and Road Construction*, (26), 73–74. [in Ukrainian]
7. Holovko, V. A. (1978). *Investigation of water and frost resistance of hot and warm asphalt concretes* (Author’s abstract of candidate’s thesis in technical sciences, specialty 05.23.05). Kharkiv Automobile and Highway Institute, Kharkiv, Ukraine. [in Ukrainian]
8. Kim, O. P., & Tsoi, V. P. (1989). Regulation of asphalt concrete properties by activation of mineral powder with corona discharge. In *Resource-saving technologies, structure and properties of road concretes* (pp. 48–49). Kharkiv: KhADI. [in Ukrainian]

9. Korolov, I. V. (1975). *Warm asphalt concrete for roads*. Kyiv: Vyshcha Shkola. [in Ukrainian]
10. Kosmin, O. V. (1973). Cold-type asphalt concrete with hydrophobized mineral powders. *Automobile Roads and Road Construction*, (12), 116–119. [in Ukrainian]
11. Kosmin, O. V. (1980). Influence of activators on the technology of activated mineral powder production. *Automobile Roads and Road Construction*, (26), 54–56. [in Ukrainian]
12. Kuchma, M. I., & Babinets, A. Ya. (1975). Influence of carboxylamines on the properties of bitumen-mineral materials. *Construction and Operation of Roads and Bridges*, Kyiv: Budivelnik, 57–63. [in Ukrainian]
13. Kudriavtseva-Valdes, S. V. (2010). *Features of the influence of polymers and surfactant additives on the adhesion properties of bitumens* (Author's abstract of candidate's thesis in technical sciences, specialty 05.23.05). Kharkiv State University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine. [in Ukrainian]
14. Kyrylova, L. O., & Chetaiev, P. M. (1973). Study of surfactant influence on the structure of bitumen films. *Automobile Roads and Road Construction*, (12), 113–116. [in Ukrainian]
15. Pechenyi, B. H. (1967). *Investigation of the influence of distillation residues of straight-run kerosene fractions and their derivatives on the properties of bitumens in asphalt concrete* (Candidate's thesis in technical sciences, specialty 05.23.05). Kharkiv, Ukraine. [in Ukrainian]
16. Poyasnyk, H. V. (1996). *Ways to improve the water resistance of asphalt concretes* (Author's abstract of candidate's thesis in technical sciences, specialty 05.23.05). Kharkiv State Automobile and Road Technical University, Kharkiv, Ukraine. [in Ukrainian]
17. Shrestha, R. B. (2004). *Water-resistant asphalt concretes based on activated mineral materials* (Author's abstract of candidate's thesis in technical sciences, specialty 05.23.05). Kharkiv State Automobile and Road College of Transport, Kharkiv, Ukraine. [in Ukrainian]
18. VBN V.2.7-219-176-2003. (2003). *Construction materials. Application of surfactants in road technologies using bitumen*. Kyiv: State Road Research Institute. [in Ukrainian]
19. Zhdaniuk, V. K., Shilenko, N. I., & Shevchenko, V. P. (2000). Water-resistance of the films of road petroleum bitumen on the surface of mineral aggregates of different genesis. In *Proceedings of the International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering (DYN-WIND 2000)* (pp. 177–180). Vyhne, Slovak Republic.
20. Zhdanyuk, V. K., & Kondrashchenko, O. V. (2000). Influence of electro-surface properties of mineral materials on the water resistance of bitumen films. *Bulletin of Dnipro National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2000(2), 117–120. [in Ukrainian]
21. Zinchenko, V. M. (1974). Use of activated bitumen in asphalt concrete technology. *Automobile Roads and Road Construction*, (16), 74–79. [in Ukrainian]

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДОРОЖНЬОГО БІТУМУ, МОДИФІКОВАНОГО ДОБАВКАМИ СЕРІЇ «АДБІТ»

Тетера Владислав Сергійович, аспірант кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна
e-mail: vl1470@ukr.net, tel.+380976824338, <https://orcid.org/0000-0001-8997-7616>.

Циркунова Катерина Валеріївна, кандидат технічних наук, головний фахівець, ДП «Група управління проектами відновлення», Київ, Україна
e-mail: ktsyrukunova@yahoo.com, tel.+380973508475.

Жданюк Валерій Кузьмович, доктор технічних наук, професор, кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна
e-mail: vkzhdanyuk@gmail.com, tel.+380679632807, <https://orcid.org/0000-0003-0420-7036>.

Анотація. В роботі наведено результати порівняльного дослідження впливу катіоноактивної поверхнево-активної добавки (ПАР) Адбіт-Р та енергозберігаючої добавки Адбіт-Н на адгезійні властивості нафтового дорожнього бітуму за показниками зчеплюваності плівок бітуму з поверхнею зерен гранітного щебеню і скляних пластин та показником адгезійної активності. Показано, що серед досліджуваних добавок ПАР Адбіт-Р забезпечує дорожньому бітуму найбільші значення досліджених показників. За показниками зчеплюваності плівок бітуму з поверхнею скляних пластин добавка Адбіт-Р перевищує енергозберігаючу добавку Адбіт-Н (за її концентрації у складі бітуму 0,4 % та 0,5 % за масою), відповідно, у 2,5 раза та 2,0 раза. За додавання до складу вихідного бітуму 0,4 % та 0,5 % енергозберігаючої добавки Адбіт-Н показник його зчеплюваності з поверхнею скляних пластин зростає, відповідно, у 3,0 та 3,7 раза, порівняно з вихідним бітумом без добавки. Встановлено, що показник адгезійної активності бітуму зростає зі збільшенням концентрації енергозберігаючої добавки Адбіт-Н у його складі.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожній одяг, шар покриття, довговічність, асфальтобетон, тривала водостійкість, дорожній бітум, адгезія, поверхневі властивості, поверхнево-активна речовина, енергозберігаюча добавка, адгезійна активність, показник зчеплюваності бітуму з мінеральною поверхнею.

Перелік посилань

1. Агеева О. М., Титар В. С. Розширення номенклатури поверхнево-активних речовин для поліпшення якості асфальтобетонних сумішей. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1985. Вип. 37. С. 30–33.
2. Агеева О. М., Фоменко Г. Р., Поясник Г. В. Модифікація різними ПАР поверхні мінеральних матеріалів в асфальтобетонній суміші для оптимізації її властивостей. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1989. Вип. 45. С. 44–48.
3. Чалохьян С. И., Володин В. И. Вяжущее совместного окисления дегтя и гудрона. *Автомобильные дороги*. 1980. № 10. С. 26–27.
4. ДСТУ 8787:2018. Бітум та бітумні вяжучі. Метод визначення зчеплюваності зі щебенем. Київ : УкрНДНЦ, 2018.
5. ДСТУ 9169:2021. Бітум та бітумні вяжучі. Визначення зчеплюваності з мінеральним матеріалом. Київ : УкрНДНЦ, 2021.
6. Фоменко Г. Р., Головка В. А. Підвищення властивостей асфальтобетону шляхом використання поверхнево-активної речовини БП-З. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1980. Вип. 26. С. 73–74.
7. Головка В. А. Дослідження водо- і морозостійкості гарячих і теплих асфальтобетонів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Харків : ХАДІ, 1978. 25 с.
8. Кім О. П., Цой В. П. Регулювання властивостей асфальтобетону активацією мінерального порошку коронним розрядом. *Ресурсозберігаючі технології, структура і властивості дорожніх бетонів*. Харків : ХАДІ, 1989. С. 48–49.
9. Корольов І. В. Дорожній теплий асфальтобетон. Київ : Вища школа, 1975. 155 с.
10. Космін О. В. Асфальтобетон холодного типу з гідрофобізованими мінеральними порошками. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1973. Вип. 12. С. 116–119.
11. Космін О. В. Вплив активаторів на технологію виробництва активованих мінеральних порошків. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1980. Вип. 26. С. 54–56.
12. Кучма М. І., Бабінець А. Я. Вплив карбоксиламінів на властивості бітумомінеральних матеріалів. *Будівництво і експлуатація доріг і мостів*. Київ : Будівельник, 1975. С. 57–63.
13. Кудрявцева-Вальдес С. В. Особливості впливу полімерів і поверхнево-активних добавок на адгезійні властивості бітумів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Харків : ХДТУБА, 2010. 19 с.
14. Кирилова Л. О., Четаєв П. М. Дослідження впливу поверхнево-активних речовин на структуру бітумних плівок. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1973. Вип. 12. С. 113–116.

15. Печений Б. Г. Дослідження впливу кубових залишків СЖК і їхніх похідних на властивості бітумів в асфальтовому бетоні : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Харків, 1967. 268 с.
16. Поясник Г. В. Шляхи підвищення водостійкості асфальтобетонів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Харків : ХДАДТУ, 1996. 19 с.
17. Шрестха Р. Б. Асфальтобетони підвищеної водостійкості на активованих мінеральних матеріалах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Харків : ХДАЗТ, 2004. 19 с.
18. ББН В.2.7-219-176-2003. Будівельні матеріали. Застосування поверхнево-активних речовин в дорожніх технологіях з використанням бітумів. Київ : Держбуд України, 2003.
19. Zhdaniuk V. K., Shilenko N. I., Schevchenko V. P. Water-resistance of the films of road petroleum bitumen on the surface of mineral aggregates of different genesis. *Proceeding of the International Conference on Dinamic of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering (DYN-WIND 2000)*. Vyhne, 2000. P. 177–180.
20. Жданюк В. К., Кондращенко О. В. Вплив електроповерхневий властивостей мінеральних матеріалів на водостійкість бітумних плівок. *Вісник ДДАБА*. 2000. Вип. 2 (22). С. 117–120.
21. Зінченко В. М. Використання активованого бітуму в технології асфальтобетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1974. Вип. 16. С. 74–79.

Дата надходження до редакції 10.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 28.02.2026.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ БАЛОК
ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ ПІД ЧАС БУДІВНИЦТВА ТИМЧАСОВИХ МОСТІВRESEARCH ON THE EFFICIENCY OF REUSING SPAN BEAMS IN THE CONSTRUCTION OF
TEMPORARY BRIDGES

Ткаченко Владислав Вячеславович, аспірант кафедри «Транспортного будівництва та управління майном» Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: vladislavtkachienko@gmail.com, тел. +380931483416



Козарчук Ігор Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: igorkozarchuk@ntu.edu.ua, тел. +380938895646,

Анотація: В статті розглянуто визначення ефективності та надійності використання демонтованих балок для спорудження тимчасового мосту. Результати дослідження з обстеження та ремонтних робіт підтвердили, що балки прогонової будови мосту можуть бути ефективно використані для спорудження тимчасових мостів. У результаті зменшуються витрати на конструкцій для тимчасового мосту, та також забезпечує швидке відновлення для безпечного та безперервного рух транспорту. Було проведено візуальний огляд на наявні дефектами, визначено відповідність типовому проекту та розрахунки на технічну придатність для повторного використання на мостовому переході через річку Тетерів на км 78+850 автомобільної дороги загального користування державного значення М-07 Київ- Ковель-Ягодин».

Ключові слова: тимчасовий міст, збірні залізобетонні мостові балки, міст, відновлення, обстеження, балки прогонової будови, повторне використання.

Вступ. Внаслідок військової агресії російської федерації проти України, на автодорозі М-07 Київ – Ковель – Ягодин було зруйновано окремі прогони та опори (рис. 1) мостового переходу через річку Тетерів на км 78+850. Міст став непридатним для експлуатації, а його технічний стан за результатними обстеження згідно вимог ДСТУ 9181:2022 було встановлено як стан 5 непрацездатний (табл. 1). Тимчасовий рух транспорту здійснювався по влаштованому насипу з будівельного сміття на залишках зруйнованих прогонів. Рух через міст не забезпечував вимог безпеки руху та був небезпечний, особливо при недотриманні правил дорожнього руху. Автодорога М-07 є стратегічною інфраструктурою для України, вона забезпечує стабільний рух вантажного транспорту з ЄС в бік столиці. Для відновлення руху, було схвалено рішення про капітальний ремонту мостового переходу через, що передбачає залишення існуючих опор, окрім зруйнованих, заміну прогонової будови, влаштування навої монолітної залізобетонної плити, мостового полотна та підходів.

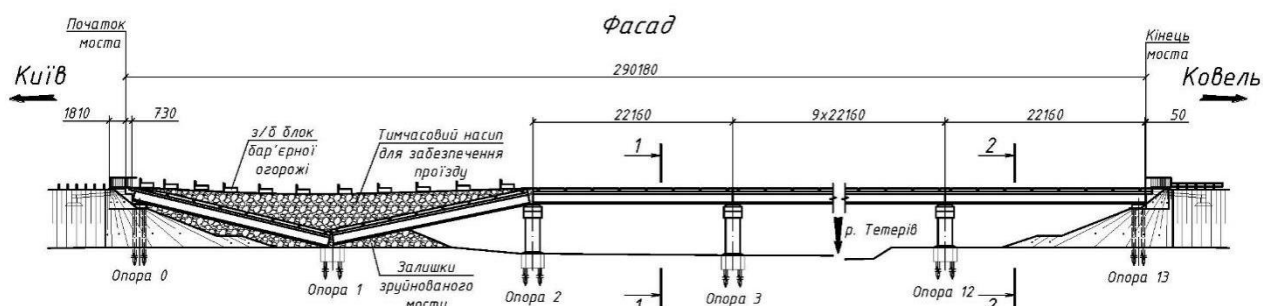


Рисунок 1 – Загальний вигляд зруйнованого мосту через річку Тетерів.

Figure 1 – General appearance of the destroyed bridge over the Teteriv River.

Таблиця 1 – Результати обстеження існуючого мосту, на підставі отриманих даних та результатів їх обробки, основні елементи мосту віднесено до таких експлуатаційних станів.

Table 1 – Results of the survey of the existing bridge, based on the data obtained and the results of their processing, the main elements of the bridge are assigned to the following operational states.

Група елементів	Експлуатаційний стан	Назва експлуатаційного стану
Опори та опорні частини	Стан 5	непрацездатний
Прогонова будова	Стан 5	непрацездатний
Мостове полотно	Стан 5	непрацездатний
Фундаменти	Стан 2	обмежено справний
Русло	Стан 3	працездатний
Підходи до мосту	Стан 4	обмежено працездатний

Виклад основного матеріалу. Оскільки під час капітального ремонту, рух через міст на деяких етапах відновлення стає неможливий, а об'їзний шлях (рис. 2) збільшено на 150-200 км, тому що найближчі мости через річку Тетерів інших автодоріг також були зруйновані через військові дії і щоб забезпечити безпечний та безперервний рух для вантажних видів автотранспорту під час ремонтних робіт, вирішено збудувати тимчасовий міст.



Рисунок 2 – Розташування мосту та об'їзний шлях.
Figure 2 – Bridge location and bypass.



Рисунок 3 – Будмайданчик під час високого паводку.
Figure 3 – Construction site during high flood.

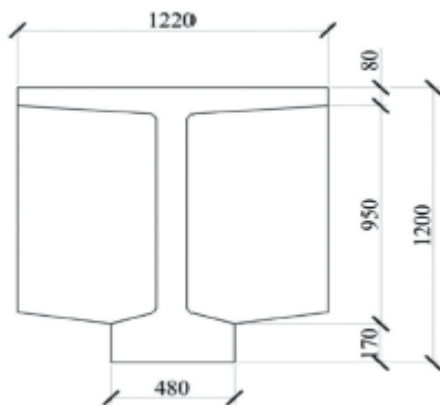
Тимчасовий міст через річку Тетерів повинен забезпечувати нормативні навантаження Н-30 та НК-80 згідно вимогами ДБН В.1.2-15:2009 та ДБН В.2.3-22:2009. Також слід враховувати річний цикл рівня води, що характеризується ясно вираженою весняною повінню та порівняно низькою меженню, яка щорічно порушується дощовими паводками, підйомом восени і підвищеним стоянням взимку.

Найвищого підйому навесні рівні води сягають в другій-третій декаді березня, іноді в лютому або квітні. Максимум зазвичай перевищує меженний рівень на 2,5-3,5 м в середній і нижній течії та на 4-6 м, в роки з високим повноводдям (рис. 3). Тривалість повені в середньому складає 1,5-2,5 місяця. Спад проходить спочатку інтенсивно, потім уповільнюється і закінчується в середньому в кінці квітня-на початку травня. Часто на спаді весняної повені проходять дощові паводки і затягують кінець повені до червня-липня. Тому влаштування тимчасового переїзду на основі насипу з трубами або малого дерев'яного моста стає неможливим.

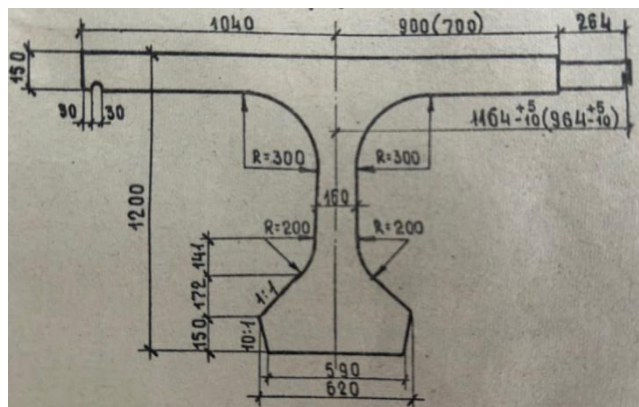
Замовником та проєктною організацією вирішено будувати тимчасовий об'їзний міст, а конструкції для прогонової будови використати демонтовані балки з існуючого моста, оскільки металева прогонова будова або влаштування нових мостових балок, для тимчасового мосту становили б чималі витрати. У структурі вартості будівництва моста вартість прогонової будови складає близько 40 %, і її більша частина — це виготовлення і монтаж мостових балок і бетонування залізобетонної монолітної плити проїзної частини мосту. Тому було вирішено використати після демонтажу частину залізобетонних балок зі зруйнованого мосту після їхнього ретельного обстеження та ремонту.



а



б



в

Рисунок 4 – Прогонова будова, зруйнованого мосту у 2022 році. а – загальний вид на прогонову будову; б – балки ВТП-15; в – балки серії №3.503-12 вип.19.

Figure 4 – The girder structure of the destroyed bridge in 2022. а – general view of the girder structure; б – VTP-15 beams; в – beams of series No. 3.503-12 issue 19.

Старий міст був побудований в 1965 році, а в 2007 році проведено капітальний ремонт старого мосту. Схема старого мосту 13х22,16 м (рис. 4, а), загальна довжина 290,18 м. У процесі капітального ремонту аварійні балки існуючого мосту були частково замінені на ті, що були в експлуатації з розібраного мосту в с. Іванків. Загалом в поперечному перерізі улаштовано: по 6 збірних залізобетонних діафрагменних попередньо напружених таврових балок довжиною 22,16 м, висотою 1,2 м по типовому проекту ВТП-15 розробки «Укргіпротранс» (рис. 4, б) та по одній додатковій залізобетонній попередньо-напруженій балці довжиною 22,16 м, яка виготовляється в опалубці для уніфікованих балок довжиною 24,0 м по типовому проекту серії 3.503-12 вип.19 (рис. 4в) — в прогонах 0-1, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 8-9; відповідно по 5 та по 2 балки — в прогонах 2-3; 4-5; 6-7; 9-10; 10-11; 11-12; 12-13. Бетонні поверхні фасадних балок оброблені захисним матеріалом. Поверх балок улаштовано накладну залізобетонну плиту товщиною 23,5 см з монолітного цементобетону підвищеної щільності з маркою по водонепроникності W8.

На початку ремонту у 2022 році територія біля існуючого мосту зі сторони Ковеля ще була не розмінована, що додавало ще більшої складності для відновлення мосту. Було розроблено два основні етапи капітального ремонту (рис. 9).

На першому етапі (рис. 5) рух транспорту здійснюється по мосту в прогонах 7-8...12-13 та по тимчасовій дорозі здійснюється в двох напрямках. Роботи виконуються в прогонах 0-1...5-6. На даному етапі виконують демонтаж балок, які потім будуть використані для конструкцій тимчасового мосту.

На другому етапі (рис. 6) рух транспорту здійснюється по тимчасовій дорозі та тимчасовому мосту в обох напрямках. Роботи виконуються по всій довжині мосту.

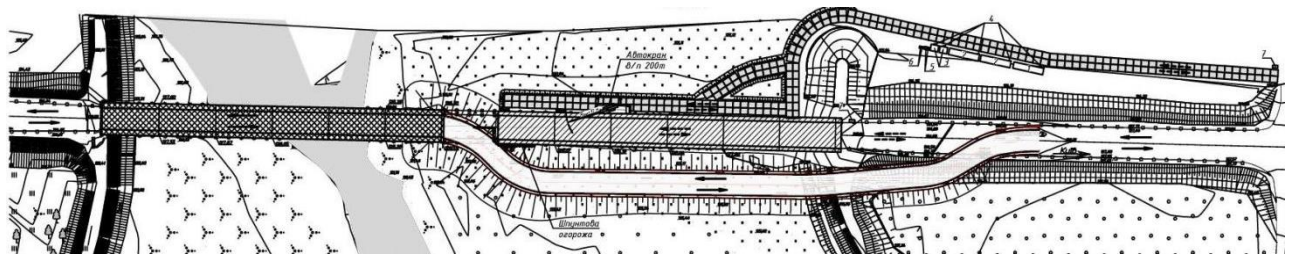


Рисунок 5 – Організація будівництва. Етап I.

Figure 5 – Construction organization. Stage I.

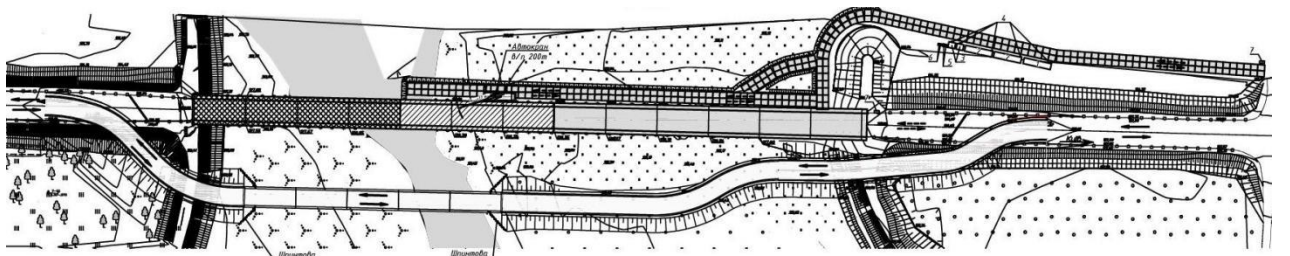


Рисунок 6 – Організація будівництва. Етап II.

Figure 6 – Construction organization. Stage II.

Для ефективності повторного використання балок, треба було забезпечити ретельне розбирання існуючої залізобетонної плити яке вимагає особливу обережність та контроль (рис. 7). В процесі з розбирання плити використовувалися ручні відбійні молотки з обмеженою силою удару. При демонтажі балок використовували кран на гусеничному ході з вантажопідйомністю 150 т. При демонтажі балок використовували домкрати, які влаштовувалися на опорі і полегшували відокремлення без значних пошкоджень. Завдяки ретельному підходу вдалося уникнути значних пошкоджень балок, та забезпечити можливість їх подальшого використання після обстеження.



Рисунок 7 – Розбирання існуючого мосту.
Figure 7 – Dismantling of the existing bridge.

Балки, що підлягали обстеженню, знаходились на території будмайданчику (рис. 8). Балки зберігалися у штабелях під відкритим небом 2 роки, і тому не так сильно вражені корозією. Балки зберігаються під відкритим небом.



Рисунок 8 – Демонтаж та складання залізобетонних балок на будмайданчику.
Figure 8 – Dismantling and assembly of reinforced concrete beams at the construction site.

Також зверху на дерев'яних підкладках зберігалася нова металева прогонова будова (рис. 9). Під час паводку 2023, залізобетонні балки були під водою, а нова металева прогонова будова тільки частково, унаслідок цього стало можливим уникнути значних дефектів на металевій прогоновій будові. Загальна кількість демонтованих балок першого етапу капітального ремонту — 28 шт. балок ВТП-15, та 7 шт. балок серії №3.503-12 вип.19. З них для будівництва тимчасового моста потрібно було відібрати 30 шт.



Рисунок 9 – Зберігання нової прогонової будови на демонтованих балках.

Figure 9 – Storage of the new span structure on dismantled beams

Обстеження існуючих балок виконувалося згідно з вимогами ДБН В.2.3-6:2009. Основним завданням є одержання даних для встановлення технічного стану, визначення залишкового ресурсу та можливості використання. Після демонтажу та складання на будмайданчику залізобетонних балок, було проведено:

- візуальний огляд демонтованих балок прогонової будови;
- визначення кількості робочої арматури і товщини захисного шару;
- проведено виявлення наявних дефектів;
- вимірювання основних розмірів балок;
- визначення міцності бетону методом неруйнівного контролю;
- визначення глибини карбонізації бетону;
- визначення міцності бетону механічними методами неруйнівного контролю.

Обстеження проводилося на місцях зберігання балок. На всі демонтовані балки складено акти згідно вимог СОУ 45.2-00018112-070:2011 "Повторне використання залізобетонних та металевих конструкцій мостів". Згідно ДСТУ 8908:2019 в акти, та на схемах внесена інформація про наявності дефектів а саме:

- Окремі місця тотального руйнування бетону полиць балок глибиною. Корозія арматури з втратою площі арматури від 20% до 100%. Дефект в основному виник при розбиранні та демонтажі балок.
- Окремі місця руйнування бетону глибиною 5...15 см з оголенням та корозією армування. Корозія арматури з втратою площі арматури від до 60%.
- Чисельні ділянки з розтріскуванням та відшаруванням захисного шару бетону.
- Тріщини з розкриттям від 0,1 до 10 мм. Крізь окремі тріщини фільтрується вода.
- Фільтрація води з вилуговуванням бетону. Фільтрація спостерігається в багатьох місцях балок. Дефект розвивається, внаслідок чого відбувається руйнування захисного шару бетону.
- Фільтрація води з вилуговуванням бетону та продуктами іржі в місцях розташування закладних виробів. Дефект інтенсивна розвивається.
- Окремі відколи бетону без оголення арматури. Дефект в основному виник при розбиранні та демонтажі балок.
- Каверни в бетоні.
- Висоли на бетонній поверхні балок.
- Сталактити.



а



б



в



г



д



е

Рисунок 10 – Основні дефекти залізобетонних балок повторного використання:

а – скол бетону з оголенням та обривом (корозійним руйнуванням); б – руйнування бетону верхньої плити, сколи бетону нижньої полицки; в – скол бетону та корозія стержнів напруженої арматури в приопорній зоні; г – сколи бетону на торцях балок з оголенням та корозією арматури; д – скол бетону нижньої полицки з оголенням та корозією стержнів напруженої арматури; е – руйнування бетону діафрагм.

Figure 10 – Main defects of reused reinforced concrete beams:

а – concrete spalling with exposure and breakage (corrosion failure); б – concrete spalling of the upper slab, concrete spalling of the lower shelf; в – concrete spalling and corrosion of prestressed reinforcement bars in the support zone; д – concrete spalling at the ends of the beams with exposure and corrosion of reinforcement; е – concrete spalling of the lower shelf with exposure and corrosion of prestressed reinforcement bars; е – concrete spalling of the diaphragms.

Дефекти фіксувалися за допомогою фотозйомки, та позначалися на схемах. На рисунку 10 зображенні основні дефекти

При обстеженні балок, які були у використанні, приділялася увага їх відповідності вимогам типового проєкту, за яким вони були побудовані.

Для визначення міцності бетону використовувався метод неруйнівного контролю за ДСТУ Б В.2.7-220:2009. В якості вимірювального пристрою використовували механічний склерометр (молоток Шмідта). Враховуючи положення молотка при вимірюванні визначається середня величина значень відскоку R_m (при цьому видаляються з розрахунку 2 максимальних і 2 мінімальних значення). Використовуючи середнє значення відскоку R_m по градуйованій таблиці визначається середнє значення міцності бетону на стиск R_b з поправкою на глибину карбонізації. Клас бетону (C) за його міцністю визначався згідно табл. 3.1 ДБН В.2.6-98:2009.

Глибина карбонізації визначалась шляхом прямого вимірювання незабарвленої товщини бетону при нанесенні розчину фенолфталеїну на свіжий висвердлений отвір у бетоні.

Результати фотофіксації визначення глибини карбонізації бетону балок та визначення міцності бетону методом неруйнівного контролю за ДСТУ Б В.2.7-220:2009 були внесені в таблицю 2.

Таблиця 2 – Фотофіксація визначення глибини карбонізації бетону балок та результати визначення міцності бетону.

Table 2 – Photo recording of the determination of the depth of carbonation of concrete beams and the results of determining the strength of concrete.

Номер балки, прогону	Глибина карбонізації, мм	Фотофіксація	Результати визначення міцності бетону
1	2	3	4
Балка Б1 / 1Т-2Т	1,6		В 45
Балка Б2 / 1Т-2Т	3,2		В 45
Балка Б3 / 1Т-2Т	1,3		В 45

До повторного використання без ремонтних допускаються балки, що знаходяться в експлуатаційному стані 1,2 згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009. Якщо балки знаходяться в експлуатаційному стані 3, 4, необхідно проводити ремонтні роботи з підвищення експлуатаційного стану. Доцільність проведення робіт визначається проведенням техніко-економічного розрахунку.

Експертна експлуатаційна оцінка технічного стану визначається за шкалою безрозмірних коефіцієнтів E у 100 балів, залежно від наявності дефектів, передбачених табл. А.3 ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009. Балки, що відносяться до 5 стану, використовувати у прогонових будовах автомобільних мостів не можна. Їх можна застосувати, наприклад, в якості перехідних плит, або для пішохідних мостів і переходів, або використати для відпрацювання технологій ремонту мостових конструкцій.

Деякі балки проекту ВТП-15 були задіяні для укріплення конусу на першому етапі (рис. 11). Так як влаштування конуса на тимчасовому об'їзді не можливо виконати за діючими вимогами, а влаштування шпунту матеріально затратно. Після демонтажу було проведено візуального огляд балок, та відібрано балки з значними дефектами які впливають на несучу здатність балок і знаходяться в експлуатаційному стані 4 та 5. Та ними було укріплено конус, унаслідок цього витрати мінімальні.



Рисунок 11 – Використання балок ВТП-15 для укріплення конусу тимчасового об'їзду.

Figure 11 – Using VTP-15 beams to reinforce the temporary detour cone.

За результатами обстеження більшість балок знаходяться в експлуатаційному стані 3, 4 та потребують ремонтні роботи для використання в тимчасовому мості. Вирішено влаштувати залізобетонну монолітну плиту з стикуванням арматурних випусків балок. Всі роботи з влаштуванням прогонових будов з балками повторного використання виконувалися згідно розробленого проєкту, та були успішно використані.

Висновок. Результати дослідження, що ґрунтується на польових роботах з обстеження підтвердили, що після виконання ремонтних робіт балки, які були у використанні прогонової будови мосту можуть бути ефективно використані для спорудження тимчасових мостів. У результаті зменшаються витрати на конструкції для тимчасового мосту, що забезпечить безпечний та безперервний рух транспорту.

Після обстежень та розрахунків балок повторного використання, більшість все ще мають достатню несну здатність, навіть поодинокі мають 2, 3 експлуатаційний стан. А оскільки деякі балки вже були втретє повторно використані, постає питання можливості багаторазового використання для спорудження тимчасових мостів, або використання в перебудови дерев'яних мостів чи в протиаварійних заходах малих мостів доріг місцевого значення де залишковий ресурс 10 років, і потребується невідкладна заміна аварійних балок прогонової будови. А в майбутньому відбудеться капітальний ремонт з заміною основних елементів мосту, або будівництва нового мосту.

За даними в статті Єрмакова І. А., Нечипоренко М. В. на тему «Повторне використання мостових балок в якості прогонових будов тимчасових мостів» Дороги і мости. 2021. Вип. 24. С. 97–

111, придатними для прогонових будов мостів без застережень можна вважати балки, які мають 1, 2, 3 експлуатаційний стан. Балки, що знаходяться у 4 експлуатаційному стані, потребують ремонту і підсилення для використання в прогонових будовах. Без ремонту їх використовувати не можна.

Таким чином, випробування мостових балок і стиків натурних розмірів свідчать про те, що прийняте конструктивне рішення забезпечує необхідну несну здатність балок і прогонової будови. Це підтверджує достатню надійність балки, що були у використанні, для спорудження тимчасового мосту

Практика показує, що необхідно також приділяти велику увагу: по-перше, розбиранню плити монолітної; по-друге, способам демонтажу балок без пошкоджень; по-третє, правильному складуванню та зберіганню балок; по-четверте, правильному перевезенню та монтажу балок.

Перелік посилань

1. ДСТУ 9181:2022 Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів.
2. СОУ 45.2-00018112-070:2011 Повторне використання залізобетонних та металевих конструкцій мостів.
3. ДСТУ 8908:2019 Автодорожні мости. Класифікація дефектів.
4. ДБН В.2.3-6:2009 Мости та труби. Обстеження і випробування.
5. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування.
6. ДБН В.1.2-15:2009 Мости та труби. Навантаження і впливи.
7. Єрмакова І. А., Нечипоренко М. В. Повторне використання мостових балок в якості прогонових будов тимчасових мостів. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 97–111.
8. Типовий проект серії 3.503-12 випуск 19. Цільноперевозні балки довжиною 12, 15, 18, 21 і 24 метри, армовані горизонтальними пучками, і довжиною 24 метри і 33 метри (висотою 1,5 і 1,7 м), армовані полігональними пучками, з натягуванням пучків на упори.
9. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зі Зміною № 1
10. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009 Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів
11. ДСТУ Б В.2.7-220:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF REUSING SPAN BEAMS IN THE CONSTRUCTION OF TEMPORARY BRIDGES

Tkachenko Vladislav V., postgraduate student of the Department of "Transport Construction and Property Management" of the National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: vladislavtkachenko@gmail.com, tel. +380931483416

Kozarchuk Ihor A., PhD (Candidate of Technical Sciences), National Transport University, Associate Professor of the Department of Transport Construction and Property Management, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: igorkozarchuk@ntu.edu.ua, tel. +380938895646, <http://orcid.org/0000-0003-4972-6016>

Abstract: The article considers the determination of the effectiveness and reliability of using dismantled beams for the construction of a temporary bridge. The results of the survey and repair work confirmed that the beams of the bridge span structure can be effectively used for the construction of temporary bridges. As a result, the costs of structures for the temporary bridge are reduced, and also provides quick restoration for safe and continuous traffic. A visual inspection was carried out for existing defects, compliance with the standard design was determined and calculations were made for technical suitability for reuse on the bridge crossing over the Teteriv River at km 78+850 of the public highway of state importance M-07 Kyiv-Kovel-Yagodyn»

Keywords: temporary bridge, prefabricated reinforced concrete bridge beams, bridge, restoration, inspection, span beams, reuse

References

1. DSTU 9181:2022 Guidelines for assessing and predicting the technical condition of road bridges. [in Ukrainian]
SOU 45.2-00018112-070:2011 Reuse of reinforced concrete and metal bridge structures. [in Ukrainian]
2. DSTU 8908:2019 Road bridges. Classification of defects. [in Ukrainian]
3. DBN V.2.3-6:2009 Bridges and pipes. Inspection and testing. [in Ukrainian]
4. DBN V.2.3-22:2009 Bridges and pipes. Basic design requirements. [in Ukrainian]
5. DBN V.1.2-15:2009 Bridges and pipes. Loads and effects. [in Ukrainian]
6. Ermakova I. A., Nechiporenko M. V. Reuse of bridge beams as span structures of temporary bridges. *Roads and Bridges*. 2021. Issue 24. P. 97–111. [in Ukrainian]
7. Typical design of the series 3.503-12 issue 19. All-carrying beams with a length of 12, 15, 18, 21 and 24 meters, reinforced with horizontal beams, and with a length of 24 meters and 33 meters (height 1.5 and 1.7 m), reinforced with polygonal beams, with tensioning of the beams on the supports. [in Ukrainian]
8. DBN V.2.6-98:2009 Structures of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. With Amendment No. 1 [in Ukrainian]
9. DSTU-N B V.2.3-23:2009 Guidelines for assessing and predicting the technical condition of road bridges
DSTU B V.2.7-220:2009 Building materials. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of non-destructive test [in Ukrainian]

Дата надходження до редакції 10.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 28.02.2026.

УДК 65.012.4:656:502.131.1
UDC 65.012.4:656:502.131.1

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-353-368

**МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ РЕАЛІЗАЦІЇ КОРПОРАТИВНОЇ СОЦІАЛЬНОЇ
ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОВАЙДЕРІВ У КОНТЕКСТІ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО
РОЗВИТКУ**

**A METHODOLOGICAL APPROACH TO ANALYZING THE IMPLEMENTATION OF
CORPORATE SOCIAL RESPONSIBILITY OF LOGISTICS PROVIDERS IN THE CONTEXT OF
THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS**



Галак Ірина Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри «Логістика та проєктний менеджмент», e-mail: i.halak@ntu.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0002-5038-7771>



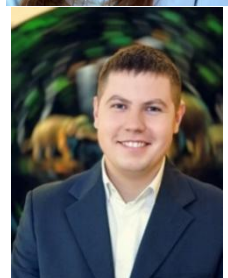
Білоног Оксана Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри «Логістика та проєктний менеджмент», e-mail: bilonog.oksana@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2471-5388>



Ткаченко Олена Валеріївна, Національний транспортний університет, асистент кафедри «Логістика та проєктний менеджмент», e-mail: tk12elena@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-5901-3156>



Овчар Денис Олександрович, Національний транспортний університет, аспірант кафедри «Логістика та проєктний менеджмент», e-mail: pitosha29@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9359-2206>

Анотація. У статті запропоновано комплексний методичний підхід до аналізу реалізації корпоративної соціальної відповідальності логістичних провайдерів у контексті цілей сталого розвитку та продемонстровано можливості його застосування на прикладі логістичних провайдерів. На основі узагальнення теоретичних положень корпоративної соціальної відповідальності та сталого розвитку

окреслено їх взаємозв'язок і показано роль корпоративної соціальної відповідальності як практичного інструменту реалізації принципів сталого розвитку на рівні підприємства, зокрема у логістичній сфері.

Отримані результати свідчать про нерівномірність розподілу корпоративних соціально-відповідальних практик за цілями сталого розвитку та концентрацію уваги логістичних провайдерів на соціально орієнтованих напрямках, пов'язаних із людським капіталом, зайнятістю та соціальним благополуччям.

Запропонований підхід може бути використаний як аналітичний інструмент для попередньої оцінки та систематизації корпоративних соціально-відповідальних практик логістичних провайдерів у контексті цілей сталого розвитку.

Ключові слова: корпоративна соціальна відповідальність, логістичні провайдери, цілі сталого розвитку, сталий розвиток, стейкхолдери, корпоративна соціально-відповідальна практик стратегія, кількісне оцінювання, метод Парето-Лоренца.

Постановка проблеми. Корпоративна соціальна відповідальність (КСВ) в Україні перебуває на етапі становлення та характеризується нерівномірним рівнем упровадження. Попри поступове поширення КСВ-практик з середини 2000-х років і наявність окремих компаній-лідерів, для більшості українських підприємств соціальна відповідальність залишається фрагментарною та недостатньо інтегрованою у стратегічне управління. Повільний розвиток КСВ зумовлений сукупністю економічних, інституційно-правових, інформаційних і соціокультурних чинників, зокрема обмеженістю фінансових ресурсів, недосконалістю нормативного регулювання, низьким рівнем обізнаності та довіри до бізнесу. Водночас євроінтеграційні процеси та зростання уваги до сталого розвитку формують передумови для посилення ролі КСВ як інструменту підвищення стійкості та конкурентоспроможності українських компаній [1].

Особливої актуальності питання КСВ набувають у логістичній сфері, яка виконує системоутворюючу функцію у функціонуванні національних та глобальних ланцюгів постачання. Логістичні провайдери здійснюють безпосередній вплив на рівень зайнятості, умови праці, розвиток людського капіталу, інтенсивність використання ресурсів, обсяги викидів, а також безпеку та якість життя населення. Водночас логістика належить до галузей із підвищеним екологічним навантаженням і значними соціальними викликами, що об'єктивно зумовлює необхідність системного впровадження принципів КСВ та їх узгодження з цілями сталого розвитку (ЦСР) [2]. В українських умовах зазначені виклики посилюються трансформаційним характером економіки, територіальними диспропорціями розвитку, обмеженістю фінансових ресурсів і впливом зовнішніх шоків, що змушує логістичні компанії адаптувати пріоритети КСВ до реальних умов функціонування.

У зв'язку з цим зростає потреба у формуванні комплексного аналітичного підходу до оцінювання реалізації КСВ логістичних провайдерів у контексті ЦСР, який поєднував би якісні та кількісні методи аналізу, враховував інтереси ключових стейкхолдерів і галузеву специфіку діяльності, а також забезпечував можливість порівняльного аналізу, моніторингу та стратегічного управління КСВ-діяльністю.

Огляд робіт. У сучасних умовах трансформації суспільного та регуляторного середовища КСВ розглядається як один із ключових чинників довгострокового розвитку підприємств, зокрема у логістичній галузі. У зарубіжних дослідженнях наголошується на зростанні ролі сталих бізнес-практик у відповідь на посилення вимог з боку державних інституцій, міжнародних партнерів, інвесторів і суспільства [3]. За результатами досліджень Ууаг А. та співавторів, КСВ еволюціонувала від інструменту формування іміджу до складової стратегічного управління та забезпечення конкурентних переваг підприємств [4].

У зарубіжній науковій літературі КСВ трактується як добровільна інтеграція соціальних і екологічних аспектів у бізнес-діяльність компаній та їх взаємодію зі стейкхолдерами. Cheng F. та співавтори обґрунтовують позитивний вплив КСВ на зростання вартості підприємства та зміцнення ринкових позицій через підвищення рівня довіри з боку зацікавлених сторін [5]. Аналогічні висновки

роблять Нунґра А. та співавтори, підкреслюючи зв'язок соціально відповідальної поведінки з фінансовими результатами та довгостроковою стійкістю бізнесу [6].

Вітчизняні науковці акцентують увагу на прикладному та трансформаційному характері КСВ в умовах української економіки. Зокрема, Зінченко О. І. розглядає КСВ як джерело формування конкурентних переваг, що сприяє зростанню інтелектуального капіталу, гудвілу та ринкової вартості підприємства, а також вирішенню соціально-економічних і екологічних проблем [7]. Левченко О. П. визначає КСВ як системне дотримання підприємством обраного напрямку задоволення очікувань соціального середовища, що позитивно впливає на результати його діяльності та взаємодію із зовнішнім середовищем [8].

У наукових дослідженнях також підкреслюється роль стейкхолдерів у реалізації КСВ. Лиска П.О. зазначає, що ефективна соціально відповідальна діяльність підприємства має охоплювати як внутрішніх, так і зовнішніх зацікавлених сторін, включаючи працівників, інвесторів, споживачів і місцеві громади [9]. Реалізація КСВ-ініціатив сприяє підвищенню мотивації персоналу, зміцненню лояльності та підвищенню ефективності управління, що підтримує досягнення ЦСР.

Змістовно категорії «корпоративна соціальна відповідальність» і «сталий розвиток» є взаємопов'язаними. КСВ розглядається як практичний механізм реалізації концепції сталого розвитку на рівні підприємства, що відображено у положеннях стандарту ISO 26000, відповідно до якого соціальна відповідальність організації полягає у відповідальності за вплив її рішень і дій на суспільство та довкілля через прозору й етичну поведінку [10].

Актуальність розвитку КСВ підтверджується наявністю розвиненої міжнародної нормативної бази, зокрема принципами Глобального договору ООН, які охоплюють права людини, трудові відносини, охорону довкілля та протидію корупції [11]. Для українських підприємств дотримання таких ініціатив є важливим орієнтиром інтеграції у європейський та глобальний економічний простір, що підтверджується зростанням частки компаній, які впроваджують КСВ та публікують відповідну звітність у світовій практиці [12].

Узагальнення зарубіжних і вітчизняних підходів дозволяє зробити висновок, що КСВ є системним інструментом стратегічного управління, спрямованим на узгодження економічних, соціальних і екологічних інтересів підприємства та його стейкхолдерів, а також на забезпечення довгострокової стійкості та конкурентоспроможності бізнесу в сучасних умовах.

Метою дослідження є обґрунтування та розроблення комплексного методичного підходу до аналізу й кількісного оцінювання реалізації КСВ логістичних провайдерів у контексті ЦСР з метою визначення пріоритетних напрямів КСВ-діяльності та підвищення ефективності управління сталим розвитком на рівні підприємства.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як зазначає Лиска П.О., реалізація КСВ охоплює широке коло стейкхолдерів, зокрема власників, інвесторів, працівників, місцеві громади та суспільство загалом [9]. У цьому контексті ефективне впровадження КСВ передбачає врахування інтересів як внутрішніх, так і зовнішніх зацікавлених сторін. До зовнішніх стейкхолдерів належать інвестори, споживачі та місцеві громади, для яких соціально відповідальна діяльність компанії виступає важливим показником її надійності, перспектив розвитку та дотримання етичних і екологічних стандартів, що безпосередньо впливає на інвестиційну привабливість і споживчий вибір.

Внутрішніми стейкхолдерами є працівники, акціонери, власники та керівництво підприємства, зацікавлені у стабільних фінансових результатах і довгостроковому розвитку компанії. Реалізація ініціатив КСВ сприяє підвищенню мотивації персоналу, формуванню лояльності та зростанню ефективності управління, що, у свою чергу, підтримує досягнення ЦСР [9].

Отже, чітка ідентифікація груп стейкхолдерів та узгодження заходів КСВ з їхніми очікуваннями є необхідною умовою ефективного управління КСВ. Узагальнену характеристику основних груп зацікавлених сторін, їх очікувань і напрямів реалізації КСВ наведено в таблиці 1.

Змістовно категорії «сталий розвиток» і «корпоративна соціальна відповідальність» є тісно взаємопов'язаними. Сталий розвиток орієнтований на задоволення потреб суспільства в економічному, екологічному та соціальному вимірах, тоді як КСВ фокусується на відповідальності підприємств за

вплив їхньої діяльності на суспільство. Таким чином, КСВ виступає практичним механізмом реалізації концепції сталого розвитку, що підтверджується положеннями стандарту ISO 26000, згідно з яким соціальна відповідальність організації полягає у відповідальності за вплив її рішень і дій на суспільство та довкілля через прозору й етичну поведінку [13].

Актуальність розвитку КСВ підтверджується наявністю розвиненої міжнародної нормативної бази, яка включає близько тридцяти документів, спрямованих на регулювання впровадження, оцінювання, управління та звітності у сфері соціальної відповідальності бізнесу. Дотримання таких документів має добровільний характер, однак для українських підприємств воно є свідченням переходу до сучасних підходів управління, впровадження організаційних інновацій і формування позитивної ділової репутації на міжнародному рівні.

Таблиця 1 – Діяльність та вигоди від упровадження КСВ для основних груп стейкхолдерів
Table 1 – Activities and Benefits of CSR Implementation for Key Stakeholder Groups

Група стейкхолдерів	Діяльність логістичного провайдера в межах КСВ	Вигоди
Власники / акціонери	Розроблення та впровадження стратегії КСВ у логістичній діяльності (зелений транспорт, оптимізація маршрутів, енергоефективні склади); регулярний ESG-моніторинг і нефінансова звітність.	Зростання ринкової вартості компанії; підвищення інвестиційної привабливості; полегшення доступу до фінансування та міжнародних партнерств.
Працівники	Участь у КСВ-ініціативах (охорона праці, екологічні програми, волонтерство); дотримання стандартів безпеки праці водіїв і складського персоналу; розвиток корпоративної культури.	Підвищення продуктивності та лояльності персоналу; зниження виробничого травматизму; безпечне й здорове робоче середовище.
Клієнти (споживачі логістичних послуг)	Надання екологічно відповідальних логістичних рішень (зниження викидів CO ₂ , оптимізація доставки); прозоре інформування щодо впливу послуг на довкілля; зворотний зв'язок.	Формування довіри до логістичного провайдера; підвищення задоволеності якістю послуг; підтримка відповідального споживання.
Стратегічні партнери	Інтеграція принципів КСВ та ESG-вимог у договори перевезення і складування; прозора соціальна та екологічна звітність.	Зміцнення довгострокових партнерських відносин; зниження репутаційних ризиків; прозорі умови співпраці.
Постачальники (перевізники, оператори складів, IT-провайдери)	Дотримання етичних стандартів у ланцюгу постачання; вимоги до екологічності транспорту та технологій; аудит постачальників.	Підвищення якості логістичних операцій; зменшення негативного екологічного впливу ланцюга постачання; стабільність співпраці.
Держава та місцеві громади	Виконання екологічних і транспортних норм; участь у програмах сталого транспорту; підтримка інновацій у логістиці та регіонального розвитку.	Стабільний розвиток транспортної інфраструктури; зниження екологічного навантаження; покращення соціально-економічних умов у регіонах.

Ключовою міжнародною ініціативою у сфері КСВ є Глобальний договір Організації Об'єднаних Націй, який визначає десять базових принципів у сфері прав людини, трудових відносин, охорони навколишнього середовища та протидії корупції. Зазначені принципи підкреслюють, що модель КСВ підприємства має формуватися не лише на основі поєднання економічних, екологічних і соціальних компонентів, але й з урахуванням етичної поведінки та антикорупційної політики, що є надзвичайно важливим для українських реалій [11].

У світовій практиці КСВ набуває дедалі більшого поширення. Зокрема, за результатами дослідження Гарвардської школи бізнесу, у 2019 році близько 90 відсотків компаній, що входять до індексу S&P 500, здійснювали соціально відповідальну діяльність та публікували відповідні звіти, тоді як у 2011 році цей показник становив лише 20 відсотків. Для українських компаній ці тенденції є важливим орієнтиром у контексті інтеграції до європейського та глобального економічного простору [12].

Як зазначає Касич А. О., реалізація концепції КСВ сприяє налагодженню якісного двостороннього зв'язку з різними групами стейкхолдерів, що забезпечує зростання компанії [14]. У зв'язку з цим ефективне впровадження КСВ в Україні потребує ідентифікації ключових груп зацікавлених сторін, розуміння їхніх потреб і очікувань, а також формування системи заходів, спрямованих на забезпечення позитивного впливу бізнесу на соціально-економічний розвиток країни та регіонів.

Варто зазначити, що існує багато визначень КСВ-стратегії. Відібрані з них подано у таблиці 2.

Таблиця 2 – Вибрані визначення КСВ-стратегії

Table 2 – Selected Definitions of the CSR Strategy

Визначення	Джерело
Зобов'язання організації інтегрувати соціальні та екологічні аспекти у процес прийняття рішень і брати на себе відповідальність за вплив своїх рішень та дій на суспільство і довкілля.	Міжнародний стандарт ISO 26000 [13]
Концепція, згідно з якою підприємства добровільно приймають рішення сприяти побудові кращого суспільства та чистішого довкілля.	Європейська Комісія [15]
Зобов'язання бізнесу діяти етично й сприяти економічному розвитку, покращуючи якість життя працівників, їхніх родин, місцевих громад і суспільства загалом.	Світова рада бізнесу зі сталого розвитку [16]
Управлінський підхід до реагування на соціальні, екологічні, економічні та етичні питання й очікування зацікавлених сторін у межах можливостей бізнесу.	Програма розвитку ООН (UNDP) [17]
Ступінь, до якого соціальні, екологічні та етичні ризики і вигоди контролюються для захисту та збільшення цінності для акціонерів.	PWN[18]

Практична реалізація КСВ у логістичній сфері дозволяє поєднати економічну ефективність із соціальними та екологічними ЦСР. Впровадження КСВ у логістиці сприяє оптимізації операційних процесів, зменшенню негативного впливу на довкілля, підвищенню рівня довіри з боку клієнтів і партнерів, а також зростанню мотивації персоналу [19, 20]. Узагальнення основних переваг впровадження КСВ у логістиці та відповідних ініціатив, що застосовуються логістичними компаніями на практиці, наведено в таблиці 3.

Таким чином, КСВ у сучасних українських умовах виступає не лише елементом стратегічного управління підприємством, але й важливим інструментом досягнення сталого розвитку, підвищення довіри до бізнесу та формування соціально орієнтованої моделі економіки. Для логістичних компаній реалізація принципів КСВ створює передумови для поєднання економічної ефективності з екологічною безпекою та соціальною відповідальністю, що відповідає як національним потребам, так і міжнародним стандартам.

Таблиця 3 – Переваги впровадження КСВ у логістичній діяльності

Table 3 – Benefits of CSR Implementation in Logistics Activities

Переваги впровадження КСВ у логістиці	Приклади ініціатив КСВ у логістичного провайдера
Підвищення операційної ефективності та зниження витрат	Оптимізація маршрутів доставки за допомогою цифрових рішень; інтелектуальна маршрутизація замовлень; використання багатоперевізних моделей доставки.
Зменшення негативного впливу на довкілля	Скорочення пробігу транспорту; впровадження екологічних видів транспорту; використання альтернативних джерел енергії; зменшення викидів CO ₂ .
Покращення іміджу та ділової репутації компанії	Використання екологічно безпечного та перероблюваного пакування; прозора соціальна та екологічна звітність; позиціонування компанії як відповідального логістичного провайдера.
Підвищення лояльності клієнтів та партнерів	Забезпечення стабільних строків доставки; відповідність екологічним та етичним стандартам; інтеграція принципів КСВ у договірні відносини.
Мотивація та залученість персоналу	Навчання персоналу принципам екологічного водіння (eco-driving); покращення умов праці; формування корпоративної культури відповідальності.
Дотримання регуляторних вимог та зниження ризиків	Проактивне впровадження екологічних стандартів; відповідність національному та міжнародному законодавству у сфері сталого розвитку.
Позитивний вплив на розвиток територій та суспільства	Участь у соціальних та освітніх проєктах; підтримка місцевих громад; програми професійної підготовки та працевлаштування.

Прикладами впровадження стратегії КСВ в Україні є діяльність провідних логістичних провайдерів, які поєднують економічну ефективність зі сталим розвитком. Зокрема, Рабен Україна впроваджує програми з енергоефективності та підтримує благодійні ініціативи для постраждалих від війни, Нова Пошта організовує безкоштовну доставку гуманітарної допомоги та інвестує в екологічні проєкти, а UVK підтримує громади та модернізує свої логістичні центри для зменшення енергоспоживання. Інші міжнародні компанії, як-от Ekol Logistics, також демонструють відповідальний підхід через екологічні перевезення, соціальні інвестиції та навчальні ініціативи [21]. Ці приклади свідчать про зростаюче значення КСВ у вітчизняному логістичному секторі як інструменту соціального впливу та екологічної свідомості (рис.1).

Разом із тим наявний практичний досвід упровадження КСВ в українській логістичній сфері характеризується фрагментарністю та відсутністю єдиного підходу до оцінювання рівня реалізації КСВ та її відповідності ЦСР. Це зумовлює необхідність формування комплексного аналітичного інструментарію, який дозволив би системно оцінювати результати КСВ-діяльності логістичних провайдерів, ідентифікувати пріоритетні напрями соціальної та екологічної відповідальності, а також обґрунтовувати управлінські рішення. У цьому контексті в роботі пропонується методика аналізу реалізації КСВ в діяльності логістичних провайдерів у контексті ЦСР, яка поєднує кількісні та структурні методи оцінювання та створює методичну основу для подальшого дослідження (рис.2).

Етап 1. Формування інформаційної бази дослідження. На першому етапі здійснюється формування інформаційної бази дослідження шляхом ідентифікації та систематизації належних практик логістичного провайдера у сфері сталого розвитку та КСВ. Об'єктом аналізу виступає сукупність реалізованих КСВ-практик, які розглядаються як дискретні аналітичні одиниці спостереження.

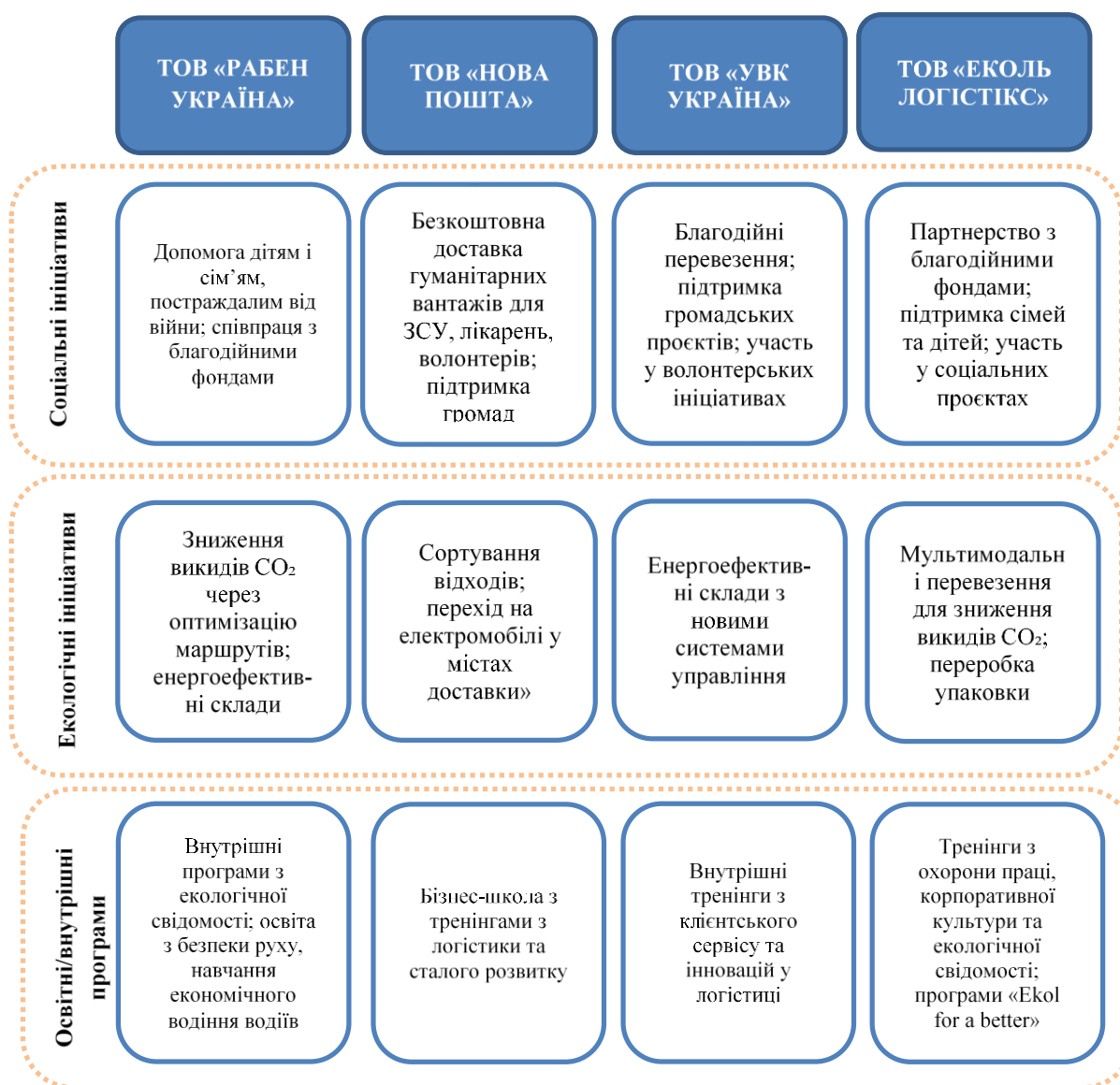


Рисунок 1 – КСВ-ініціативи логістичних компаній в Україні
Figure 1 – CSR initiatives of logistics companies in Ukraine

Збір інформації здійснюється з використанням методів якісного контент-аналізу на основі відкритих та звітних джерел, зокрема нефінансової та інтегрованої звітності, звітів зі сталого розвитку, матеріалів профільних асоціацій відповідального бізнесу, а також офіційних корпоративних вебресурсів і публічних комунікацій компаній.

У результаті формується множина КСВ-практик:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, \quad (1)$$

де p_i – окрема реалізована практика сталого розвитку.



Рисунок 2 – Структурно-логічна схема методики аналізу реалізації КСВ логістичних провайдерів

Figure 2 – Structural and Logical Framework of the Methodology for Analyzing the Implementation of CSR by Logistics Service Providers

Для забезпечення динамічного аналізу практики групуються за дискретними часовими інтервалами, що дозволяє сформулювати часову структуру даних та забезпечити подальший аналіз змін у часі.

$$t=1, 2, \dots, T, \quad (2)$$

Етап 2. Класифікація практик за ЦСР. На другому етапі здійснюється класифікація кожної практики p_i відповідно до ЦСР, визначених Порядком денним сталого розвитку до 2030 року. Множина ЦСР задається як:

$$C=\{C_1, C_2, \dots, C_{17}\}, \quad (3)$$

Віднесення практик до відповідних ЦСР здійснюється на основі змістовної відповідності завданням та індикаторам конкретних цілей. Одна практика може бути співвіднесена з кількома цілями, що відображає її мультифункціональний соціально-економічний або екологічний характер.

Результатом етапу є матриця відповідності:

$$A=[a_{ij}], \quad (4)$$

де $a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо практика } p_i \text{ відповідає ЦСР } C_j, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$

Етап 3. Кількісна оцінка рівня реалізації ЦСР. На третьому етапі здійснюється кількісна оцінка рівня реалізації окремих ЦСР шляхом агрегування класифікованих практик. Кількість практик, що відповідають кожній ЦСР, визначається за формулою:

$$N_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad (5)$$

де N_j – кількість практик, реалізованих у межах j -ї ЦСР.

Загальна кількість реалізованих практик визначається як:

$$N = \sum_{j=1}^{17} N_j, \quad (6)$$

Для порівняльного аналізу визначається відносна частка кожної ЦСР у загальній сукупності практик:

$$P_j = \frac{N_j}{N}, \quad (7)$$

Отримані показники дозволяють оцінити структуру пріоритетів сталого розвитку в діяльності логістичного провайдера.

Етап 4. Аналіз динаміки та стабільності реалізації ЦСР. Для оцінки стабільності реалізації окремих ЦСР у часовому вимірі використовується аналіз варіативності. Для кожної ЦСР формується часовий ряд:

$$\{N_{j1}, N_{j2}, \dots, N_{jT}\}, \quad (8)$$

де N_{jt} – кількість практик, реалізованих у межах j -ї ЦСР у період t .

Середній рівень реалізації ЦСР визначається як:

$$\bar{N}_j = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T N_{jt}. \quad (9)$$

Середньоквадратичне відхилення визначається як:

$$\delta_j = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (N_{jt} - \bar{N}_j)^2}. \quad (10)$$

Коефіцієнт варіації використовується як інтегральний показник стабільності реалізації:

$$V_j = \frac{\delta_j}{\bar{N}_j}, \quad (11)$$

Низькі значення V_j свідчать про системний характер реалізації відповідної ЦСР, тоді як високі значення вказують на нерівномірність або фрагментарність заходів.

Етап 5. Визначення пріоритетних ЦСР методом Парето–Лоренца. З метою ідентифікації ключових пріоритетів КСВ застосовується метод Парето–Лоренца. Для цього ЦСР впорядковуються за спаданням значень N_j .

Для кожної впорядкованої ЦСР визначається кумулятивна частка:

$$K_k = \sum_{j=1}^k P_j. \quad (12)$$

Рівняння (12) дозволяє виділити групу цілей, які формують основний внесок у реалізацію КСВ-стратегії логістичного провайдера.

Етап 6. Інтерпретація результатів та формування рекомендацій. На шостому етапі дослідження здійснюється узагальнення та інтерпретація кількісних результатів реалізації ЦСР на основі статистичних показників, розрахованих відповідно до формул середнього арифметичного, стандартного відхилення та коефіцієнта варіації.

З метою ілюстрації практичного застосування запропонованого методичного підходу припускається, що для кожної ЦСР C_j у межах аналізованого періоду T сформовано часовий ряд значень кількості реалізованих практик N_{jt} , який використовується як вхідна інформація для подальших розрахунків, таблиця 4.

Проведений розрахунок середнього арифметичного, стандартного відхилення та коефіцієнта варіації для кожної ЦСР дозволив кількісно охарактеризувати не лише загальний рівень реалізації відповідних напрямів КСВ, але й ступінь стабільності їх упровадження у часовому вимірі. Отримані значення середнього арифметичного $\bar{N}_j$ відображають інтенсивність реалізації окремих ЦСР протягом аналізованого періоду, тоді як стандартне відхилення δ_j та коефіцієнт варіації V_j дають змогу оцінити варіативність і регулярність відповідних заходів.

Аналіз коефіцієнтів варіації свідчить про наявність суттєвої диференціації між ЦСР за ознакою стабільності реалізації. Низькі значення V_j характерні для цілей, реалізація яких має системний та відносно рівномірний характер у часі, тоді як високі значення вказують на епізодичність або фрагментарність відповідних ініціатив. Водночас наявність ЦСР із нульовими значеннями показників реалізації підтверджує асиметричність структури КСВ-активності та свідчить про вибіркового характер стратегічних пріоритетів логістичного провайдера.

Отримані статистичні характеристики виконують функцію аналітичного фільтра, який дозволяє перейти від динамічного аналізу до структурного узагальнення результатів. Зокрема, середні значення показників реалізації $\bar{N}_j$ використовуються як вхідна інформація для подальшого ранжування ЦСР за рівнем їх представленості в загальній сукупності КСВ-практик. Це створює методично обґрунтовану основу для застосування методу Парето–Лоренца та побудови таблиці розподілу ЦСР за кількістю реалізацій, часткою у загальному обсязі та кумулятивною часткою.

Таблиця 4 – Статистичні показники реалізації ЦСР Т

Table 4 – Statistical Indicators of SDGs Implementation over Period T

Ціль	Кількість реалізацій відповідної ЦСР			Середнє арифметичне	Стандартне відхилення	Коефіцієнт варіації
	Період 1	Період 2	Період 3			
C1	2	2	1	1,67	0,47	28,28
C2	0	2	1	1,00	0,82	81,65
C3	23	15	11	16,33	4,99	30,54
C4	18	7	16	13,67	4,78	35,01
C5	5	4	3	4,00	0,82	20,41
C6	0	0	0	0,00	0,00	0,00
C7	2	1	2	1,67	0,47	28,28
C8	17	16	13	15,33	1,70	11,08
C9	4	5	4	4,33	0,47	10,88
C10	8	9	3	6,67	2,62	39,37
C11	9	1	4	4,67	3,30	70,71
C12	10	1	12	7,67	4,78	62,40
C13	11	3	5	6,33	3,40	53,67
C14	0	0	0	0,00	0,00	0,00
C15	5	1	2	2,67	1,70	63,74
C16	1	5	1	2,33	1,89	80,81
C17	4	5	3	4,00	0,82	20,41
Разом	119	77	81	92,33	33,03	35,77

Таким чином, проведений етап статистичного аналізу забезпечує логічний перехід до наступного етапу дослідження, а саме до ідентифікації пріоритетних ЦСР, які формують основний внесок у реалізацію КСВ-стратегії логістичного провайдера та потребують поглибленої управлінської інтерпретації. Отримані результати зведено у таблицю 5, яка відображає порівняльні характеристики реалізації ЦСР та створює аналітичне підґрунтя для формування управлінських рекомендацій щодо вдосконалення КСВ-стратегії логістичного провайдера.

Проведений кількісний аналіз розподілу ЦСР свідчить про нерівномірну концентрацію досліджуваних ініціатив за окремими ЦСР. Найбільшу частку становлять цілі С3 «Гарне здоров'я та благополуччя» (17,69 %), С8 «Гідна праця та економічне зростання» (16,61 %) та С4 «Якісна освіта» (14,80 %). Сукупно ці три цілі формують 49,10 % загального обсягу, що вказує на їх домінуючу роль у досліджуваній вибірці. Наступна група цілей, до якої належать С12 «Відповідальне споживання та виробництво», С10 «Зменшення нерівності» та С13 «Боротьба зі зміною клімату», доповнює кумулятивну частку до 71,48 %. Це свідчить про значущість соціально-економічних та екологічних аспектів сталого розвитку, однак їхня роль є вторинною порівняно з цілями, орієнтованими на людський капітал та економічну стабільність.

Водночас окремі ЦСР мають мінімальне або нульове представлення. Зокрема, С1 «Захист екосистем суші», С7 «Доступна та чиста енергія» та С2 «Подолання голоду» у сукупності формують незначну частку, тоді як С6 «Чиста вода та санітарія» та С14 «Збереження морських екосистем» не відображені у вибірці. Така структура зумовлена не відсутністю значущості зазначених цілей загалом, а галузевою та територіальною специфікою діяльності логістичного провайдера в Україні.

Зокрема, питання забезпечення доступу до чистої питної води та санітарії не є критичними для операційної діяльності досліджуваного суб'єкта, оскільки вони перебувають у межах нормативно врегульованої інфраструктурної системи. Водночас відсутність фокусу на цілі, пов'язані зі збереженням морських екосистем, пояснюється обмеженням або фактично призупиненим використанням морських транспортних коридорів, що знижує релевантність даної цілі для національного логістичного контексту.

Таблиця 5 – Реалізація ЦСР за період Т через впровадження кращих практик у логістичного провайдера

Table 5 – Implementation of SDGs over Period T through the Adoption of Best Practices by a Logistics Service Provider

№	Ціль сталого розвитку	Кількість	Частка, %	Кумулятивна частка, %
1	C3 – Гарне здоров'я та благополуччя	49	17,69	17,69
2	C8 – Гідна праця та економічне зростання	46	16,61	34,30
3	C4 – Якісна освіта	41	14,80	49,10
4	C12 – Відповідальне споживання та виробництво	23	8,30	57,40
5	C10 – Зменшення нерівності	20	7,22	64,62
6	C13 – Боротьба зі зміною клімату	19	6,86	71,48
7	C11 – Сталі міста та громади	14	5,05	76,53
8	C9 – Гендерна рівність	13	4,69	81,23
9	C5 – Промисловість, інновації та інфраструктура	12	4,33	85,56
10	C17 – Партнерство заради цілей	12	4,33	89,89
11	C15 – Мир, справедливість та сильні інститути	8	2,89	92,78
12	C16 – Без бідності	7	2,53	95,31
13	C1 – Захист екосистем суші	5	1,81	97,11
14	C7 – Доступна та чиста енергія	5	1,81	98,92
15	C2 – Подолання голоду	3	1,08	100
16	C6 – Чиста вода та санітарія	0	0	100
17	C14 – Збереження морських екосистем	0	0	100

Таким чином, виявлена структура розподілу ЦСР відображає адаптацію пріоритетів сталого розвитку до реальних умов функціонування логістичного провайдера, а не системний дефіцит екологічної відповідальності.

На основі отриманих кількісних даних побудовано діаграму Парето-Лоренца (рис. 3), метою якої є виявлення ЦСР, що формують основну частку сукупного впливу в діяльності логістичного провайдера, а також обґрунтування їх пріоритизації для подальшого аналізу та управлінських рішень [22].

З графіка видно, що перші кілька цілей формують основну частку сукупного результату: досягнення рівня близько 80 % забезпечується обмеженою кількістю цілей, що підтверджує доцільність їх віднесення до групи А за ABC-аналізом.

Таким чином, діаграма наочно демонструє нерівномірний розподіл пріоритетів сталого розвитку та дозволяє ідентифікувати ключові напрями, концентрація управлінських зусиль на яких забезпечує максимальний ефект.

Висновки з проведеного дослідження та перспективи подальших розвідок за даним напрямом. У статті досліджено КСВ як важливий елемент стратегічного управління логістичними провайдерами та практичний інструмент реалізації ЦСР. Проведений теоретичний аналіз дозволив обґрунтувати тісний взаємозв'язок між концепціями сталого розвитку та КСВ, відповідно до якого КСВ виступає механізмом трансформації глобальних ЦСР у конкретні управлінські рішення та практики на рівні підприємства.

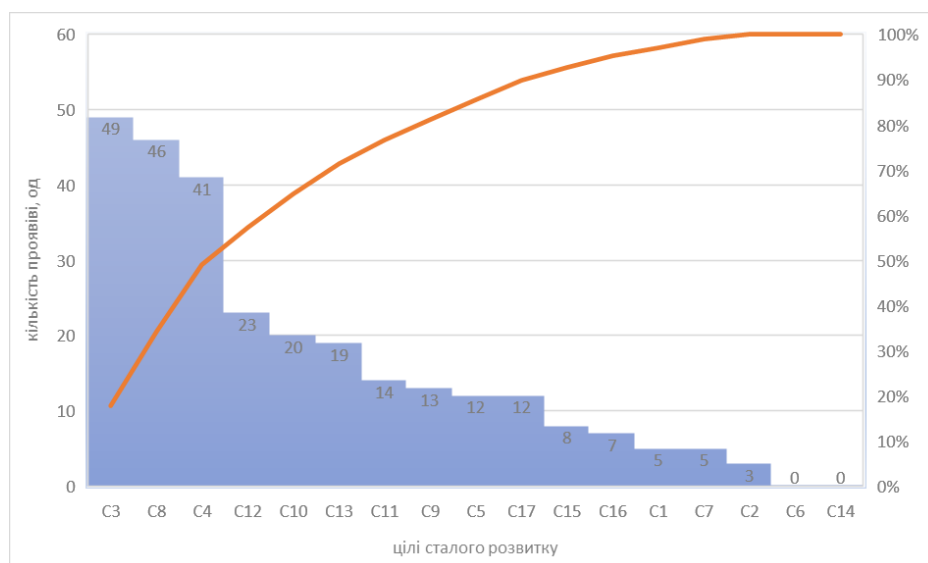


Рисунок 3 – Діаграма Парето-Лоренца щодо досягнення ЦСР логістичним провайдером за період T
Figure 3 – Pareto-Lorenz Diagram of SDGs Achievement by a Logistics Service Provider over Period T

У роботі показано, що реалізація КСВ у логістичній діяльності охоплює широке коло стейкхолдерів, від власників і працівників до клієнтів, партнерів, держави та місцевих громад. Узгодження інтересів цих груп визначає спрямованість і результативність КСВ-стратегії логістичного провайдера, а також формує передумови для довгострокового економічного розвитку, підвищення довіри до бізнесу та зменшення соціальних і екологічних ризиків.

Аналіз практик КСВ в логістичному секторі України, зокрема на прикладі діяльності провідних логістичних провайдерів, засвідчив зростаючу роль КСВ як інструменту соціального впливу та екологічної свідомості бізнесу. Водночас встановлено, що наявний досвід упровадження КСВ має переважно фрагментарний характер і не супроводжується єдиним підходом до оцінювання рівня досягнення ЦСР, що ускладнює формування обґрунтованих управлінських рішень.

З огляду на це в роботі запропоновано методику аналізу реалізації КСВ в діяльності логістичних провайдерів у контексті ЦСР. Запропонований підхід дозволяє систематизувати КСВ-практики, оцінити інтенсивність та стабільність їх реалізації у часовому вимірі, а також визначити пріоритетні напрями відповідальності, які формують основний внесок у загальний соціально-економічний та екологічний ефект діяльності компанії.

Результати кількісного аналізу показали нерівномірний розподіл КСВ-ініціатив за окремими ЦСЗ та концентрацію зусиль логістичного провайдера переважно на цілях, пов'язаних із людським капіталом, умовами праці, освітою та соціальним благополуччям. Водночас обмежене або нульове представлення окремих цілей зумовлене галузевою та територіальною специфікою логістичної діяльності в Україні і не свідчить про загальну відсутність екологічної чи соціальної відповідальності.

Побудова діаграми Парето-Лоренца дозволила наочно продемонструвати концентрацію результатів реалізації КСВ та виокремити ключові ЦСР, фокусування управлінських зусиль на яких забезпечує найбільший ефект. Це підтверджує доцільність використання запропонованої методики як аналітичного інструменту для підтримки стратегічних рішень у сфері КСВ.

Загалом отримані результати мають як наукову, так і практичну цінність. З наукової точки зору робота поглиблює методичні підходи до аналізу КСВ у логістиці, поєднуючи структурний, статистичний та візуально-аналітичний інструментарій. У практичному вимірі запропонована методика може бути використана логістичними провайдерами для оцінювання власної КСВ-діяльності, формування більш системної та вимірюваної КСВ-стратегії, а також для узгодження корпоративних ініціатив із ЦСР в умовах сучасних викликів для українського бізнесу.

Перелік посилань

1. Ольга Беспалько Про виклики та перспективи корпоративної соціальної відповідальності в Україні (2024). URL: <https://theinweb.media/pro-vyklyky-ta-perspektyvy-korporatyvnoyi-soczialnoyi-vidpovidalnosti-v-ukrayini/> (дата звернення: 18.11.2025).
2. Харсун Л. Корпоративна соціальна відповідальність логістичного бізнесу. *Вісник Київського національного торговельно-економічного університету*. 2021. № 4. С. 56–67. [http://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021\(138\)04](http://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021(138)04)
3. Younis, H., Sundarakani, B., & Vel, P. (2016). The impact of implementing green supply chain management practices on corporate performance. *Competitiveness Review*, 26(3), 216-245.
4. Uyar, A., Karaman, A.S., & Kilic, M. (2020). Is corporate social responsibility reporting a tool of signaling or greenwashing? Evidence from the worldwide logistics sector. *Journal of Cleaner Production*, 253.
5. Cheng, F., Zhang, Y., & Wang, J. (2021). Economic policy uncertainty exposure and stock price bubbles: Evidence from China. *International Review of Financial Analysis*, 88, 201961.
6. Hunjra, A.I., Ali, S., & Zhang, Z. (2022). Sustainable development: The impact of political risk, macroeconomic policy uncertainty and ethnic conflict. *International Review of Financial Analysis*, 84.
7. Зінченко О. І., Хімченко А. М. Корпоративна соціальна відповідальність в Україні: сучасні реалії та перспективи розвитку. *Бізнес-інформ*. 2013. № 4. С. 281–286.
8. Левченко О. П. Сутність поняття «корпоративна соціальна відповідальність (КСВ)». *Економіка транспортного комплексу*. 2014. № 24. С. 39–54.
9. Лиска П. О. Управління корпоративною соціальною відповідальністю підприємства як фактор сталого розвитку. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 54. С. 473–479. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-54-89>.
10. Указ Президента України № 722/2019 від 30.08.2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року». URL : <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825> (дата звернення: 15.10.2025).
11. Sustainable Development Goals. United Nations Development Programme. URL: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals> (дата звернення: 18.10.2025).
12. Governance and Accountability Institute. 90% of S&P 500® Index Companies Published Sustainability / Responsibility Reports in 2019. URL: https://www.ga-institute.com/fileadmin/ga_institute/images/FlashReports/2020/G_A-Flash-Report-2020.pdf (дата звернення: 18.10.2025).
13. International Organization for Standardization. (2010). ISO 26000:2010 Guidance on social responsibility. <https://www.iso.org/standard/42546.html>
14. Касич А. О., Стояненко В.О. Теоретичні основи управління соціальною відповідальністю підприємств у сучасних умовах. *Приазовський економічний вісник*. 2017. № 5 (05). С. 186–191.
15. European Commission. (2011). A renewed EU strategy 2011-14 for Corporate Social Responsibility. Brussels: European Commission. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0681> (дата звернення: 29.11.2025).
16. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2022). Corporate Social Responsibility: Making good business sense. Geneva: WBCSD. Retrieved from <https://www.wbcsd.org/Programs/Social-Impact/Resources/CSR-Making-good-business-sense> (дата звернення: 29.11.2025).
17. United Nations Development Programme (UNDP). (2024). Corporate social responsibility and sustainable development goals: A framework for business. New York: UNDP. Retrieved from <https://www.undp.org/publications/csr-framework> (дата звернення: 29.11.2025).
18. Szymczak, M. (2023). Sustainable supply chain management in the light of PWN definitions and practices. *Journal of Business Research*, 160, 113785. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.113785>
19. Chen, L.; Fu, Y.; Liu, Y.; Wang, C. The Impact of Logistics Corporate Social Responsibility on Supply Chain Performance: Using Supply Chain Collaboration as an Intermediary Variable. *Sustainability* 2023, 15, 9613. <https://doi.org/10.3390/su15129613>

20. Rácz, D. The Importance of corporate social responsibility in a medium sized logistics company (2020). URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/343253/Racz_Domokos.pdf (дата звернення: 20.12.2025).

21. Приклади соціальної відповідальності бізнесу: 7 українських компаній, що змінюють країну (2025). URL: <https://givingtuesday.ua/statti/prykklady-soczialnoyi-vidpovidalnosti-biznesu-7-ukrayinskyh-kompanij-shho-zminyuyut-krayinu/> (дата звернення: 20.12.2025).

22. Jiří Střelec. The Pareto Analysis. Режим доступу: <https://www.ownway.eu/articles/the-pareto-analysis/> (дата звернення: 13.12.2025)

A METHODOLOGICAL APPROACH TO ANALYZING THE IMPLEMENTATION OF CORPORATE SOCIAL RESPONSIBILITY OF LOGISTICS PROVIDERS IN THE CONTEXT OF THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

Halak Iryna I., Ph.D., associate Professor, National Transport University, associate professor of Department of Logistics and Project Management, e-mail: 1017imiia@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5038-7771>.

Bilonoh Oksana, Ph. D., associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Logistics and Project Management, bilonog.oksana@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2471-5388>

Tkachenko Olena V., National Transport University, Assistant of Department of Logistics and Project Management, e-mail: tkcholena@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-5901-3156>

Ovchar Denys O., National Transport University, Ph.D student., Department of Logistics and Project Management, e-mail: pitosha29@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9359-2206>

Summary. The article proposes a comprehensive methodological approach to analyzing the implementation of Corporate Social Responsibility (CSR) by logistics providers within the framework of the Sustainable Development Goals (SDGs) and demonstrates its practical application through case studies of logistics companies. Based on a synthesis of theoretical foundations regarding corporate social responsibility and sustainable development, the study outlines their interconnection and highlights the role of CSR as a practical tool for implementing sustainable development principles at the enterprise level, specifically within the logistics sector.

The findings indicate an uneven distribution of CSR practices across the SDGs, revealing a concentration of logistics providers' efforts on socially-oriented areas related to human capital, employment, and social well-being.

The proposed approach can serve as an analytical tool for the preliminary assessment and systematization of CSR practices among logistics providers in the context of the SDGs.

Keywords: Corporate Social Responsibility, Logistics Providers, Sustainable Development Goals, Sustainable Development, Stakeholders, CSR strategy, Quantitative Assessment, Pareto-Lorenz method.

References

1. Olha Bespalko Pro vyklyky ta perspektyvy korporatyvnoi sotsialnoi vidpovidalnosti v Ukraini (2024). URL: <https://theinweb.media/pro-vyklyky-ta-perspektyvy-korporatyvnoyi-soczialnoyi-vidpovidalnosti-v-ukrayini/> (data zvernennia: 18.11.2025). [in Ukrainian]

2. Kharsun L. Korporatyvna sotsialna vidpovidalnist lohistychnoho biznesu. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu*. 2021. № 4. S. 56–67. [http://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021\(138\)04](http://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021(138)04) [in Ukrainian]

3. Younis, H., Sundarakani, B., & Vel, P. (2016). The impact of implementing green supply chain management practices on corporate performance. *Competitiveness Review*, 26(3), 216-245.

4. Uyar, A., Karaman, A.S., & Kilic, M. (2020). Is corporate social responsibility reporting a tool of signaling or greenwashing? Evidence from the worldwide logistics sector. *Journal of Cleaner Production*, 253.

5. Cheng, F., Zhang, Y., & Wang, J. (2021). Economic policy uncertainty exposure and stock price bubbles: Evidence from China. *International Review of Financial Analysis*, 88, 201961.

6. Hunjra, A.I., Ali, S., & Zhang, Z. (2022). Sustainable development: The impact of political risk, macroeconomic policy uncertainty and ethnic conflict. *International Review of Financial Analysis*, 84.
7. Zinchenko O. I., Khimchenko A. M. Korporatyvna sotsialna vidpovidalnist v Ukraïni: suchasni realiï ta perspektyvy rozvytku. *Biznes-inform*. 2013. № 4. S. 281–286. [in Ukrainian]
8. Levchenko O. P. Sutnist poniattia «korporatyvna sotsialna vidpovidalnist (KSV)». *Ekonomika transportnoho kompleksu*. 2014. № 24. S. 39–54. [in Ukrainian]
9. Lyska P. O. Upravlinnia korporatyvnoi sotsialnoi vidpovidalnistiu pidpriemstva yak faktor staloho rozvytku. *Ekonomika ta suspilstvo*. 2023. Vyp. 54. S. 473–479. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-54-89>. [in Ukrainian]
10. Ukaz Prezydenta Ukrainy № 722/2019 vid 30.08.2019 «Pro Tsili staloho rozvytku Ukrainy na period do 2030 roku». URL : <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825> (data zvernennia: 15.10.2025). [in Ukrainian]
11. Sustainable Development Goals. United Nations Development Programme. URL: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals> (data zvernennia: 15.10.2025)
12. Governance and Accountability Institute. 90% of S&P 500® Index Companies Published Sustainability / Responsibility Reports in 2019. URL: https://www.ga-institute.com/fileadmin/ga_institute/images/FlashReports/2020/G_A-Flash-Report-2020.pdf (data zvernennia: 15.10.2025)
13. International Organization for Standardization. (2010). ISO 26000:2010 Guidance on social responsibility. <https://www.iso.org/standard/42546.html> (data zvernennia: 15.10.2025).
14. Kasych A. O., Stoianenko V.O. Teoretychni osnovy upravlinnia sotsialnoi vidpovidalnistiu pidpriemstv u suchasnykh umovakh. *Pryazovskyï ekonomichnyiï visnyk*. 2017. № 5 (05). S. 186–191. [in Ukrainian]
15. European Commission. (2011). A renewed EU strategy 2011-14 for Corporate Social Responsibility. Brussels: European Commission. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0681> (data zvernennia: 15.10.2025)
16. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2022). Corporate Social Responsibility: Making good business sense. Geneva: WBCSD. Retrieved from <https://www.wbcsd.org/Programs/Social-Impact/Resources/CSR-Making-good-business-sense> (data zvernennia: 15.10.2025).
17. United Nations Development Programme (UNDP). (2024). Corporate social responsibility and sustainable development goals: A framework for business. New York: UNDP. Retrieved from <https://www.undp.org/publications/csr-framework> (data zvernennia: 15.10.2025).
18. Szymczak, M. (2023). Sustainable supply chain management in the light of PWN definitions and practices. *Journal of Business Research*, 160, 113785. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.113785>
19. Chen, L., Fu, Y., Liu, Y., Wang, C. The Impact of Logistics Corporate Social Responsibility on Supply Chain Performance: Using Supply Chain Collaboration as an Intermediary Variable. *Sustainability* 2023, 15, 9613. <https://doi.org/10.3390/su15129613>
20. Rácz, D. The Importance of corporate social responsibility in a medium sized logistics company (2020). URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/343253/Racz_Domokos.pdf (data zvernennia: 15.10.2025).
21. Pryklady sotsialnoi vidpovidalnosti biznesu: 7 ukrainskykh kompanii, shcho zminiuiut krainu (2025). URL: <https://givingtuesday.ua/statti/plyklady-soczialnoyi-vidpovidalnosti-biznesu-7-ukrayinskykh-kompanij-shho-zminyuyut-krayinu/> (data zvernennia: 20.12.2025).
22. Jiří Střelec. The Pareto Analysis. Access: <https://www.ownway.eu/articles/the-pareto-analysis/> (data zvernennia: 20.12.2025)

Дата надходження до редакції 11.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 08.02.2026.

UDC 338:330
УДК 338:330

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-369-382

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE COMPETITIVE POTENTIAL OF
ROAD TRANSPORT ENTERPRISES IN CONDITIONS OF CRISIS AND INSTABILITYМЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ КОНКУРЕНТНОГО ПОТЕНЦІАЛУ
АВТОТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ КРИЗИ ТА НЕСТАБІЛЬНОСТІ

Bohdan Galytsky, graduate student of the Department of Economics, National Transport University, Kyiv, Ukraine, galitskyi@ukr.net, tel. +380675380569, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovich-Pavlenko, 1,

<https://orcid.org/0009-0007-5494-4962>



Angelina Spitsyna, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Economics, National Transport University, angel7a@ukr.net, tel. +380679053181, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovich-Pavlenko St.,1

<https://orcid.org/0000-0001-9730-6249>

Abstract. The article examines and provides a comparative analysis of modern methods for assessing and managing the competitive potential of a motor transport enterprise. The existing advantages are identified, and shortcomings that may lead to calculation inaccuracies are outlined. The main requirements for an effective system of enterprise competitiveness assessment are formulated.

In today's realities, Ukrainian motor transport enterprises face intense competition both domestically and in foreign markets, which are often saturated with high-quality services and products. Road transport occupies a key position in the country's transport system. The main factors determining the competitiveness level of a motor transport enterprise include the technical and technological level, the qualification level of personnel and management, the quality of products and services, and the presence of an effective marketing and sales strategy. Significant success in the market can only be achieved if the enterprise attains a competitive advantage in the transport services market, based on the most critical success factors.

Economic assessment and diagnostics of enterprise competitiveness involve the use of a system of methodological approaches, where differentiation, criteria, and model indicators determine the adequacy of results, taking into account the specifics of the competitive environment. The analysis has shown that among the methods of assessing enterprise competitiveness, the most accurate—under appropriate informational support—is the parametric (indicator-based, criterion-based) group of methodological approaches. An objective competitiveness assessment is carried out using methods where the final calculation involves the computation of an integrated competitiveness index.

There are effective methods for determining a company's competitive position considering its strategic potential, which makes it possible to evaluate the rationality of the business entity's strategic positioning within the economic system. Given that a key feature of a company's competitiveness is its dynamic nature, the level of competitive position cannot be regarded as a long-term characteristic of the enterprise's competitive potential. Despite the effectiveness of economic and financial performance, we propose using a matrix (strategic) approach for assessment methods.

Keywords: competitive potential, competitive position, competitiveness, motor transport enterprise, methodological approaches, assessment, enterprise competitiveness methods, crisis, instability, BCG model, McKinsey method, Shell/DPM model, PIMS method, Porter's model, enterprise competitiveness factors, factors of enterprise competitiveness.

Introduction. Problem Statement and Relevance of the Chosen Topic.

The current stage of development of the global transport market is marked by fundamental changes in the structure and dynamics of freight flows, increased demands for the quality of transport services, and the need for rapid adaptation to new technological challenges. Digitalization, process automation, the growth of e-commerce, and rising environmental requirements are creating new competitive conditions in which transport companies are forced to reconsider their strategic approaches to doing business. Transport is a strategically important sector that significantly determines a nation's strength, as it meets society's needs for the transportation of goods and passengers.

Today, competition that has emerged amid crisis, instability, and military conflict must be viewed not as a rivalry between different modes of transport, but rather as a phenomenon that stimulates the development of the transport sector, the search for advanced transportation technologies aimed at reducing the cost of transport services and increasing delivery speed.

In the context of global instability, modern economic science is marked by a rethinking of traditional approaches and tools for managing enterprise competitiveness. This is due to rapid changes in the business environment, continuous scientific and technological progress, growing globalization of economic relations, and intensified competition among enterprises. Ukrainian companies face additional challenges due to the military aggression by the Russian Federation, as well as economic crisis and instability. Under these conditions, the search for and implementation of additional effective tools to enhance enterprise competitiveness becomes a relevant and important issue for successful business operations and ensuring economic growth[17].

The competitiveness of a motor transport enterprise serves as a fundamental basis for its market positioning alongside key competitors and is a key precondition for ensuring sufficient operational efficiency in economic, social, and environmental aspects [23].

The relevance of studying the competitive potential of a motor transport enterprise—as an important and methodologically productive category of modern economic science—is driven by the fact that at the current stage of market relations development in Ukraine, the role of consumers is growing, the risks and uncertainties of enterprise operations are increasing, dependence on the marketing environment is intensifying, and competition for service and product markets is becoming fiercer. In this context, motor transport enterprises are focusing less on studying competitors, clients, intermediaries, suppliers, or the external environment, and more on their internal capabilities, which are unique and specific to each company—thus determining their competitive advantage [7].

Therefore, the search for competitive advantage—given the widespread availability of material resource markets—comes down to possession of information and knowledge. In today's environment, developing and substantiating the theoretical, methodological, and practical foundations for assessing the competitive potential of motor transport enterprises takes on primary importance.

Analysis of Recent Research and Publications. The study and assessment of the competitive potential of enterprises amidst ongoing market transformation processes is a highly relevant task that requires urgent attention.

Significant scientific contributions to the theoretical and practical study of competitiveness issues have been made by both foreign and domestic scholars, including H.L. Azoyev, I. Ansoff, A.P. Gradov, H.L. Bagiev, Ya.B. Bazilyuk, M.H. Bilopolskyi, F. Wiersema, A.E. Voronkova, Ph. Kotler, C. McConnell, M. Porter, R.A. Fatkhutdinov, Kh.A. Faskhiyev, A.Yu. Yudanov, and others.

The issue of enhancing the competitiveness of transport enterprises has attracted the attention of researchers such as G.I. Bashnyanin, O.V. Arefieva, I.M. Myagkykh, N.Yu. Kovalenko, O.Yu. Zham, H.Yu. Popova, V.I. Kotelianets, O.M. Vovk, V.M. Bondarenko, O.P. Krasnyak, Kh.M. Dorofieieva, M.M. Andriienko, V.H. Shynkarenko, and others.

Researchers such as T.O. Dyachenko, S. Voitko, V. Heiets, M. Zhelikhovska, L. Karpenko, B. Kvasniuk, S. Klymenko, O. Kuzmin, O. Savytska, S. Savchuk, V. Frolova, V. Sharko, and others have explored management processes, methodological approaches to assessing the level of competitiveness, and have contributed to shaping scientific perspectives on management improvement and development. Despite the popularity of these topics, there still remain discrepancies in the approaches to enhancing the competitiveness of transport enterprises.

Substantial scientific contributions to the formation, assessment, and development of enterprise competitive potential have been made by economists such as I.V. Balabanova, A.V. Hryniov, O.S. Druhova, N.P. Karachyna, I.M. Kyrchata, O.O. Kokovikhina, V.V. Matveiev, N.I. Sarai, R.A. Tolpezhnikov, L.A. Yankovska, and others.

Despite the achievements of researchers, the assessment of the competitive potential of motor transport enterprises has its own specific features and requires further development and refinement.

The aim of the study is to develop theoretical foundations, scientific and methodological recommendations, and practical tools for managing the competitiveness of a motor transport enterprise based on a comprehensive assessment of the overall level of competitive potential and its individual components, particularly under current conditions of crisis and instability.

Presentation of the Main Research Material and Obtained Results.

The competitive environment of motor transport enterprises includes the totality of market participants and external factors that determine their activities, namely other transport companies, clients, suppliers of transport infrastructure and technologies, as well as regulatory and economic conditions that encourage the search for more favorable working conditions [22].

The main components of the competitive environment of a motor transport enterprise are:

- Other carrier enterprises: These are direct competitors offering similar transport services (freight, passenger, specialized) competing for clients by offering different prices, service quality, routes, and delivery speeds.
- Service consumers: Clients (individuals and businesses) who create competition as their transportation needs determine demand and the choice of a particular carrier.
- Suppliers: Companies that provide resources for transport operation: manufacturers of vehicles, fuel, spare parts, as well as owners or tenants of transport infrastructure (airports, ports, railways, roads).
- Competition for clients: Transport companies competing with each other to attract clients by offering better transportation conditions.
- Variety of transport modes: Competition may arise between companies using different types of transport, e.g., road enterprises competing with rail or maritime freight transport.
- Regulatory bodies: State authorities and agencies that set rules, standards, licensing requirements, and taxes significantly impacting transport enterprises and the level of competition.
- Technological development: New technologies (electronic ordering platforms, GPS trackers, new transport types) creating new business opportunities or threatening those lagging behind innovations.
- Economic factors: Fuel prices, inflation, economic conditions, purchasing power of the population and businesses, and global economic trends directly affect demand for transport services and enterprise profitability.
- Competitiveness: The ability of a company to operate efficiently and ensure profitability in a competitive market.
- Infrastructure: The state of transport infrastructure influences the overall competitiveness of a region or country.
- Natural and geographical conditions: Location, terrain, and climate affect the choice of transport mode, infrastructure development, and transport network formation.

The main trends in road freight transportation include increasing volumes in construction, food, and processing industries, and a rise in container transport. The road transport market remains highly competitive, with fierce tariff battles for cargo despite rising diesel fuel prices, spare parts, food for drivers, repair rates, increased tariffs, declining transport orders, and driver outflow abroad. In addition, significant changes in strategic management methodology have occurred due to the emergence and implementation of the resource-based approach [5].

Operating under these rapidly changing conditions intensifies the problem of developing tools that allow enterprises to quickly and efficiently adapt and achieve their market, economic, and financial goals. Managing the competitiveness of motor transport enterprises is primarily such a tool [2].

The competitiveness of a motor transport enterprise is a generalized indicator of its sustainable operation, including results from various core, auxiliary, and management units, subsystems, and resources involved. It reflects the enterprise's relative advantages over other market participants (competitors) in key competitive areas or objective capabilities of the enterprise and its competitors to achieve specific homogeneous goals. The economic mechanism underlying competitiveness is a complex set of elements regulating decision-making in the enterprise's business activities. For effective functioning, each element must be in constant interrelation with others [24].

Based on an analysis of publications and practical materials from various authors, there is a need to clarify the economic category (concept) of the "competitive potential of an enterprise."

For example, I.V. Balabanova defines competitive potential as a set of internal and external opportunities of an enterprise relative to its operating environment, through which it forms competitive advantages and secures a stable market position among competitors [4].

I.M. Kirchata sees competitive potential as a systematic complex of harmonized resources and capabilities of the internal environment aimed at forming competitive advantages under constant external changes and resource limitations to achieve competitive goals and their rational use for maintaining a high competitive status [14].

O.O. Kokovikhina considers competitive potential as a set of resources and capabilities that provide competitive advantages amid frequent external changes and help achieve set goals to increase market competitiveness [15].

Regarding classification, O.S. Drugova suggests dividing competitive potential based on [10]:

- Complexity of formation (through resources; through certain activities)
- Formation goals (ensuring operation; ensuring development; ensuring survival)
- Implementation goals (achieving current goals; achieving strategic goals)
- Stability of competitive advantages (based on stable competitive advantages; based on unstable ones)
- Level of implementation (realized competitive potential; prospective competitive potential)

Additionally, source [14] notes that competitive potential consists of production, managerial, labor, marketing, informational, financial-economic, and innovative potentials [14].

In this context, I.V. Balabanova distinguishes the following potentials within competitive potential: competitive environment potential; information technology potential; socio-economic potential; innovation potential; strategic competitive potential; competitive tools potential; competitive rating potential [4].

N.P. Karachina emphasizes the components of competitive potential formation as production, managerial, personnel, marketing, financial, and information-innovation potentials [11]. Meanwhile, O.O. Kokovikhina argues competitive potential should be analyzed combining resource and managerial potentials [15].

Given this, O.S. Drugova proposes viewing competitive potential from the following perspectives: functional (capabilities, abilities, and competitive strength); resource (resources, sources, means, and reserves); structural (components and parts of the term "potential"); resultative (number of competitive advantages and goals achieved) [10]. Drugova also suggests evaluating competitive potential by the following main types (which together form competitive potential) [10]:

- Financial potential: calculated by efficiency of financial resource use, enterprise profitability, tax burdens, available financial resources, etc.
- Production potential: calculated by production capacity, gross output, number and use level of fixed assets.
- Labor potential: determined by worker qualifications, compliance with production needs, labor productivity, workforce size.
- Sales potential: characterized by market share, brand compliance with competitive market demands.
- Managerial potential: reflects management structure, document flow, management system effectiveness, and responsiveness [10].

To develop an adequate methodological base for evaluating competitive potential of enterprises of various types and scales, it is necessary to consider the characteristics of each method in terms of analytical information, data processing approaches, analysis criteria, and interpretation tools (Table 1).

Scientific literature presents various classification characteristics of methods for assessing an enterprise's competitive potential.

Table 1 – Classification of methods for assessing the competitive potential of an enterprise

Таблиця 1 – Класифікація методів оцінки конкурентного потенціалу підприємства

Classification Criterion	Methods for Assessing Competitive Potential of an Enterprise
1. By direction of information base formation	-Criterion-based -Expert-based
2. By method of displaying final results	-Graphical -Mathematical -Logical
By possibility of developing management	-One-time -Strategic
4. By method of assessment	-Indicator-based -Matrix-based

Current competitiveness of an enterprise is defined as the ability of an economic entity to generate a profit on invested capital in the short term that is not lower than the set profitability level [6].

Competitive potential — the potential capability (current prerequisites) to maintain or increase competitiveness in the long term — is seen as the ratio of the current potential of the enterprise to the optimal potential (normative capabilities), which is set according to the level of future instability in the external environment.

The competitive potential of an enterprise simultaneously unites three levels of connections and relations:

- Competitive potential reflects the past, i.e., the set of properties accumulated by the system during its formation, which determine the possibility of its functioning and development. It can be noted that it essentially acquires the meaning of the term “resource”;
- Competitive potential characterizes the level of practical application and utilization of available capabilities. This ensures the distinction between realized and unrealized capabilities, thus partially overlapping with the concept of “reserve”;
- Competitive potential is oriented toward development (the future). Being a unity of stable and changing states, competitive potential contains elements of the enterprise’s future development.

The enterprise’s activity is carried out under the influence of both external and internal environments, so analyzing the formation of competitive potential allows identifying reserves for its increase both internally and externally.

To determine the necessary methodological base for assessing the competitive potential of enterprises of different types and scales, it is necessary to consider the characteristics of each method from the perspective of analytical information, approaches to its processing, accepted criteria for analysis, and means of interpreting results [2].

The indicators used in well-known methods generally reflect the most significant results of enterprise activity, factors of the external environment, as well as the possible potential for their development. In scientific literature, there are the following approaches to quantitative assessment of enterprise competitiveness (Table 2).

Table 2 – Classification of approaches to assessing the competitive potential of an enterprise**Таблиця 2** – Класифікація підходів до оцінки конкурентного потенціалу підприємства

Name of the Approach	Essence
Structural	Decision-making regarding maintaining a particular market position based on the level of industry monopolization (production and capital concentration, presence of barriers for new entrants to the transport market, etc.)
Resource-based	Analysis of available resources and their efficiency of use
Situational	The process of evaluating the effectiveness of market actions in a specific situation prevailing in the transport market
Target-oriented	The process of determining evaluations reflecting the economic results of the transport enterprise compared to the relevant target indicators of competitors
Qualitative	Study of the competitiveness of services and works of the enterprise, which affects its overall competitiveness
Theory of Competitive Advantages	Establishing the nature of the transport enterprise's advantages compared to competitors, allowing to determine the enterprise's market position

The methods presented consider the concept of the enterprise's competitive potential only from a single defined perspective and do not take into account some other types of enterprise activities.

The assessment of the competitive potential of a motor transport enterprise is an important tool for forming an effective development strategy, ensuring market stability, and increasing the level of competitiveness. In this context, there are several methodological approaches that allow for a comprehensive evaluation of the competitive potential of a motor transport enterprise [16].

The methodological approaches to assessing the competitive potential of a motor transport enterprise include:

1. Systemic approach, which views the enterprise as a unified system composed of interdependent elements (personnel, vehicles, finances, technologies, management). Competitive potential is formed as a set of resource and functional capabilities of the enterprise. This approach enables the identification of the enterprise's strengths and weaknesses, considering both internal and external factors. Tools of the systemic approach include SWOT analysis, PEST analysis (for external environment), and value chain analysis.

2. Resource (resource-functional) approach, based on the concept that competitive advantages depend on the availability and efficiency of resource use: human, material-technical, financial, informational. It is important not only to possess resources but also to effectively transform them into competitive advantages (e.g., quality of customer service, timeliness of delivery, technical condition of vehicles). Methodologies include resource valuation, resource utilization efficiency analysis, matrix models (e.g., BCG, GE/McKinsey).

3. Comparative approach, which involves comparing the key indicators of the enterprise with competitors or industry standards and is focused on benchmarking and identifying competitive advantages. Indicators include cost of transportation, quality of services, delivery time, level of automation/digitalization, condition of the vehicle fleet (average age, vehicle types).

4. Marketing approach, oriented towards studying the market positions of the motor transport enterprise (market share, brand recognition, customer satisfaction). It analyzes the needs and expectations of consumers, as well as the enterprise's ability to satisfy them better than competitors. Methods used include customer surveys, loyalty analysis, and customer satisfaction index (CSI) assessment.

5. Economic-mathematical approach, which applies quantitative methods and models to assess competitive potential, such as integral evaluation based on a system of indicators, factor analysis, expert evaluation. Indicators may include profitability, labor productivity, fleet utilization coefficient, average delivery speed, asset turnover, and others.

6. Innovative approach, which analyzes the ability of the motor transport enterprise to engage in innovative activities, implement new technologies, digital solutions, and environmental standards. In modern conditions, competitiveness largely depends on the level of digital transformation of motor transport

enterprises (GPS monitoring, CRM systems, electronic logistics, etc.).

Thus, a comprehensive assessment of the competitive potential of a motor transport enterprise should be based on a combination of several methodological approaches, allowing an objective evaluation of both internal capabilities and external threats. The most effective is an integrated approach that combines systemic, resource, marketing, and economic-mathematical analyses [3].

Having studied different perspectives on the methodological support for competitive potential assessment, it should be noted that many authors propose a wide range of analytical indicators used to evaluate various components of competitive potential (Table 3).

Table 3 –Research on methods for assessing the competitive potential of a motor transport enterprise

Таблиця 3 – Дослідження методів оцінки конкурентного потенціалу автотранспортного підприємства

Group of	Evaluation Methods	Advantages	Disadvantages
Matrix Methods	Growth Matrix	Ability to compare changes in competitive potential with changes in efficiency of its use	This method does not reflect the relationships between indicators defining the enterprise's competitive potential
	Enterprise Potential Matrix	Detailed and elaborated algorithm for calculating competitive potential	Narrow approach to defining competitive potential; not all its elements are taken into account
Multidimensional Statistical Analysis Methods	Comparative Correlation-Regression Analysis	Allows identifying the most problematic areas in the enterprise's competitive potential, thus revealing reserves for growth and target indicators for	Resulting performance indicators are incompletely considered; there is no cause-effect relationship between potential elements
	Systematic Analytical Analysis	Allows analysis of indicators by comparing various indicators	Duplication of information occurs during competitive potential assessment
Comprehensive Methods	Comprehensive Element-by-Element Study	Based on the theory of competitive advantages, dividing elements of competitive potential into lower and higher order potentials, allowing study of competitive potential in both short- and long-term perspectives	Relies on assumptions about how the enterprise will operate under certain conditions, which may not actually hold true
Comparative Methods	Non-parametric "Pattern" Method	Focus on best practices and industry position in determining further development strategy	Subjective approach to assessing the significance (weight) of individual indices
Expert Methods	Expert Evaluation Method	Accessibility of the method, relatively low cost, and minimal time consumption	Assessment is mostly based on subjective expert opinions

The conducted analysis of methods for assessing competitive potential has shown that the methodological toolkit for evaluation is currently in the process of forming various directions and concepts.

In international business, a variety of methods are used to assess the competitive potential of enterprises [14].

Based on the formation of the information base, researchers distinguish between criterial and expert assessment methods.

Criterial methods are characterized by forming the analytical information base using the reporting or planned documentation of the transport enterprise. Both absolute (natural, conditionally natural, labor, cost) and relative indicators (such as product profitability, asset turnover) are used. With appropriate information support, these methods are the most accurate since the initial data for calculations are deterministic.

Expert methods are simpler to apply because they do not require gathering complete information about competitors and are based on stochastic data obtained through expert evaluations. However, the advantage of these methods is also their disadvantage: the subjectivity of experts may distort the assessment results, thus they do not ensure high accuracy but allow probabilistic evaluation of the enterprise's status. These methods are widely used to analyze competitors' capabilities since, unlike analyzing one's own enterprise, it is often legally impossible to obtain necessary information from many parts of the information base.

By the way results are presented, evaluation methods are classified into graphical, mathematical, and logical methods.

Graphical methods provide the highest level of perception of final assessment results, interpreted through graphical objects (pictures, charts, diagrams, etc.). Such interpretation is appropriate when summarizing analysis results, for example in investment project summaries, but must necessarily be accompanied by corresponding calculations and logical conclusions. Moreover, graphical analysis methods do not always ensure the necessary accuracy because the functions reflecting real economic processes only approximate the actual dependencies.

Mathematical methods are based on specific calculation algorithms and include modeling production and sales factors. The volume of analytical work and calculation complexity largely depend on the number of factors considered in the multifactor model and whether this model is dynamic. These methods provide sufficient calculation accuracy but require creating a controlled database and yield the best results when computational techniques with carefully substantiated software are used.

Logical methods are algorithmic evaluation methods based on logical assumptions. This group of methods delivers quick results without large costs. Their application gives positive outcomes in cases where processes are difficult to model and indicators are not formalized.

Regarding the possibility of managerial decision-making, there are one-time and strategic evaluation methods.

One-time methods are static, as they assess only the current state without considering past periods, and do not allow for development of forward-looking measures. Analysis results from this group allow operational decisions for tactical tasks related to enterprise functioning and development but do not satisfy long-term planning needs.

Strategic analysis methods are based on creating dynamic process models. This group allows not only assessing the competitive potential status at a given date but also developing strategic measures for its enhancement.

By evaluation approach, there are indicator and matrix methods.

Indicator methods are the most modern and widespread in market economies. They are based on using a system of indicators that assess the competitive potential of an enterprise and the national economy as a whole. An indicator is a set of characteristics that formally describe the state of parameters of a specific studied object, based on which recommendations for improving its functioning efficiency are formulated. Each indicator, in turn, is subdivided into several indicators reflecting the status of individual elements of the studied object.

Matrix methods enable a systematic approach to analysis, organizing both the system's constituent elements and the interrelations among them. Interrelations and elements may be considered in static or dynamic terms. Using matrix methods, managers gain the ability to assess the competitive potential level of both their enterprise and nearby competitors, which facilitates the development of market behavior strategies.

One method for assessing competitive potential is controlling, a comprehensive enterprise management system that includes managerial accounting, cost accounting, and cost analysis to control all cost items, all departments, and all components of produced goods or services, as well as their further planning. Controlling includes methods such as break-even analysis, benchmarking, cost analysis, portfolio analysis, ABC analysis, XYZ analysis, and forecast indicator determination methods [19].

Break-even analysis is a key aspect of managing fixed and variable costs, as well as sales volume (goods, works, services).

Benchmarking is a systematic activity aimed at searching, evaluating, and studying best practices regardless of their size, industry, or geographic location.

Cost analysis is considered one of the most effective tools for reducing production costs, particularly raw materials and supplies. The analysis studies all product characteristics and calculation items to identify reserves for cost reduction.

Portfolio analysis results inform decisions about additional investments in specific production programs, reinvestment or asset sales, and risk management strategies for each strategic business unit.

ABC analysis can be used to identify cost reduction reserves by cost centers, investment projects, or product types. Moreover, this method suits portfolio optimization of products produced and sold by the enterprise, maximizing product sales volumes, etc.

XYZ analysis is a functional-organizational form of optimizing the absolute value and structure of enterprise costs and serves as a technology for justifying managerial decisions on optimizing absolute cost values by identifying and recognizing reserves for cost reduction.

Assessment of the competitive potential of a transport enterprise forms the foundation for managerial decisions on its formation, maintenance, development, and maximization of use. Identifying and developing competitive potential is the key to achieving a high level of enterprise competitiveness.

In the context of digital economy development, the "effective competition" method gains special importance among known methods for assessing competitiveness[1]. This method involves evaluating the use of resources (human, financial, technical, technological, enterprise infrastructure, information technologies, etc.), assessing effective enterprise performance, analyzing its financial condition, and product competitiveness. The "effective competition" method becomes especially relevant amid digital economy growth due to enterprises gaining additional resources that directly impact work efficiency—for example, opportunities arising from using social networks in enterprise management, strategic management, and goal achievement [1].

Foreign experience in methodological approaches to assessing competitive potential is extremely important for forming effective economic strategies for transport enterprises and the national economy as a whole, especially in times of crisis and instability. Various countries employ different methodologies based on a combination of qualitative and quantitative indicators.

Key International Approaches to Assessing Competitive Potential:

1. *Michael Porter's Approach (USA)*: One of the most influential frameworks for analyzing the competitiveness of a company, industry, or country. Key tools include: Porter's Five Forces Model – analyzes threats from competitors, suppliers, buyers, potential entrants, and substitute products. Porter's Diamond Model of National Advantage – considers factor conditions, demand conditions, related and supporting industries, and firm strategy, structure, and rivalry. Advantages: comprehensive analysis; focus on both external and internal environments.

2. *SWOT Analysis* (commonly used in the USA, EU, and Japan): A widely accepted strategic planning method used to assess Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats. Applied for evaluating internal resources and identifying external environmental factors affecting competitiveness.

3. *Benchmarking* (widely applied in the USA, Germany, Japan): This method involves comparing a company's performance indicators with industry leaders or global best practices. Main types include: Internal (within the company), Competitive (with direct competitors), Functional (with companies performing similar functions), Generic (against global best practices).

4. *VRIO Analysis* (Resource-Based View, USA): A method of evaluating a company's resources in terms of sustainable competitive advantage. Criteria include: Value – does the resource provide customer value? Rarity – is the resource rare? Imitability – is it hard to imitate? Organization – can the company utilize the resource effectively?

5. *Key Performance Indicators (KPI)*: Widely used in the EU and USA to quantitatively measure competitive potential. Examples include: market share, EBITDA, return on investment, labor productivity, and innovation activity.

6. *Boston Consulting Group (BCG Matrix)*: A portfolio analysis tool for evaluating product or business unit performance based on market share and growth rate. Categories: Stars, Cash Cows, Question Marks, and Dogs.

7. *Assessment of National Competitiveness – Global Competitiveness Index (GCI)*: Developed by the World Economic Forum (WEF), this index evaluates national competitiveness based on factors such as: Institutions, Infrastructure, Macroeconomic environment, Education, Innovation, etc. It is used to assess a country's overall competitive potential.

8. *Balanced Scorecard (BSC)*: Developed in the USA by Kaplan and Norton, this approach evaluates a company's competitiveness through four perspectives: Financial, Customer, Internal business processes, Learning and growth.

Thus, international experience demonstrates that effective assessment of competitive potential requires a comprehensive approach – combining both qualitative (SWOT, VRIO, BSC) and quantitative (KPI, GCI) methods. Flexibility and adaptability to market conditions are key elements of such assessments. It is advisable for Ukrainian companies and analysts to integrate the best global practices while considering the specifics of the national market.

A transport company can achieve significant success in the market only if it secures a competitive advantage in the transport services sector, based on the most critical success factors. Assessing the company's competitiveness must rely on a comprehensive and multidimensional approach, considering both external and internal factors, financial stability, and the actual performance of competitors.

A transport enterprise is considered competitive in domestic and regional markets if it provides high-quality services, maintains optimal pricing, and implements innovations in its operations.

To strengthen its competitive position, the company must identify the gap between its current potential and strategic goals, based on a systematic analysis of its strategic position[24].

Conclusions. The development and implementation of a scientific and methodological approach to assessing the competitive potential of a road transport enterprise can provide a number of significant advantages, helping the company to substantially improve its market position and become considerably more competitive.

It has been noted that the analysis of a transport enterprise's competitive potential must be comprehensive, as this potential is formed through the combination of several factors, which, in turn, become the key objects of analysis.

The implementation of such assessment tools can also make the enterprise more attractive to investors, potentially leading to the inflow of additional investments necessary for the company's development and growth.

List of sources

1. Arefieva O.V., Babych S.M. Strategic Aspects of Managing the Competitiveness of an Enterprise in the Digital Economic Space. *Competitiveness of Enterprises in the International Digital Space: Monograph*. Edited by O.V. Arefieva. Kyiv: FOP Maslakov, 2019. 342 p. pp. 7–14. [in Ukrainian]

2. Bazilyuk V.B., Svitlytskyi V.A., Skarbarchuk T.V. Theoretical Aspects of the Formation of an Approach to Assess the Competitive Potential of an Enterprise. *Scientific Papers / Наукові записки*. 2022, No. 2 (65). pp. 131–136. [in Ukrainian]

3. Balabanova I.V. Managing Competitive Rationality: Theory and Methodology: Abstract of dissertation for Doctor of Economics degree, field 08.00.04 “Economics and Management of Enterprises (by type of economic activity)” / I.V. Balabanova. Donetsk, 2009. 40 p. [in Ukrainian]

4. Balabanova I.V. Competitive Potential as the Basis for Forming Competitive Advantages [Electronic resource] / I.V. Balabanova. – Mode of access: http://www.rusnauka.com/3_ANRR_2009/Economics/38882.doc.htm [in Ukrainian]

5. Blyzniuk A.O. Competitiveness as an Indicator of the Effective Operation of Road Transport Enterprises. *Economics. Finance. Law*. 2023, No. 9. pp. 6–9. DOI: <https://doi.org/10.37634/efp.2023.9.1> [in Ukrainian]

6. Borisiuk I.O., Melnyk K.O. Managing the Competitiveness of a Road Transport Enterprise. *Modern Economics*. 2018, No. 12. pp. 6–11. DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V12\(2018\)-01](https://doi.org/10.31521/modecon.V12(2018)-01) [in Ukrainian]
7. Halytskyi B.Yu. The Role of Competitive Potential in Ensuring the Development of a Road Transport Enterprise. *Scientific Journal "Economic Bulletin of the Dnipro Polytechnic Institute"* No. 1 (85), 2024. pp. 161–170. https://ev.nmu.org.ua/index.php/uk/archive?arh_article=1581
8. Hudzynskyi O.D., Sudomyr S.M., Hurenko T.O. Managing the Formation of Competitive Potential of Enterprises (theoretical-methodological aspect): Monograph. Kyiv: IPC DSZU, 2010. 212 p. [in Ukrainian]
9. Dashko I.M. Study of Basic Methods for Assessing the Level of Competitiveness of Enterprises. *Zaporizhzhia*, 2020. pp. 108–110. DOI: <http://10.32702/2306-6806.2020.5.108> [in Ukrainian]
10. Drugova O.S. Evaluation of the Competitive Potential of Mechanical Engineering Enterprises: Abstract of Candidate's Dissertation (PhD) in Economics, field 08.00.04 "Economics and Management of Enterprises (by type of economic activity)" / O.S. Drugova; National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute." Kharkiv, 2015. 22 p. [in Ukrainian]
11. Karachyna N.P. Competitive Potential and Its Role in the Formation of Enterprise Competitiveness // *Economic Space*. 2014, No. 86. pp. 164–172. [in Ukrainian]
12. Kvasco A.V. Analysis of Methods for Assessing Enterprise Competitiveness. *Scientific Notes*. No. 1 (54). Kharkiv, 2017. pp. 111–118. [in Ukrainian]
13. Kyrychenko O.M., Migdalskyi A.V. Methods of Assessing Enterprise Competitiveness. *Effective Economy*. 2017, No. 2. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5428> [in Ukrainian]
14. Kyrchata I.M. Assessment of Competitive Potential in the System of Managing Enterprise Competitiveness: Abstract of Candidate's Dissertation in Economics, field 08.00.04 "Economics and Management of Enterprises" / I.M. Kyrchata. Mariupol, 2007. 20 p. [in Ukrainian]
15. Kokovikhina O.O. Management of Competitiveness of Rolling Stock Repair Enterprises of Railway Transport: Abstract of Candidate's Dissertation in Economics, field 08.00.04 "Economics and Management of Enterprises (by type of economic activity)." Kharkiv, 2010. 20 p. [in Ukrainian]
16. Competitive Potential and Its Role in the Formation of Enterprise Competitiveness. URL: <http://inmad.vntu.edu.ua/portal/-static/CCAE8BAF-0B8A-42A9-A8C8-B65C4DABEC0A.pdf>. (accessed: 15.08.2025) [in Ukrainian]
17. Kosar N., Kuzio N. The Impact of the War on the Ukrainian Road Freight Transport Market and Its Subsequent Development. *Bulletin of Lviv University*. 2023. Issue 65. pp. 14–23. URL: <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/economics/article/viewFile/12025/12383> (accessed: 10.08.2025) [in Ukrainian]
18. Matviev V.V. Methods for Assessing the Competitive Potential of an Enterprise. *Effective Economy*. 2013, No. 12. pp. 123–129. [in Ukrainian]
19. Sarai N.I. Methodological Principles of Assessing Enterprise Competitive Potential. *Economics and Enterprise Management*. No. 1, 2019. pp. 97–103. [in Ukrainian]
20. Semenova T.V., Tsesar K.H. Methodological Approaches to Assessing Economic Growth and Enterprise Development. *Eastern Europe: Economy, Business and Management*. 2019, No. 6 (23). pp. 410–414. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/188-23> [in Ukrainian]
21. Skladanyvska O. Analysis of the Current State of Freight Road Transport Enterprises in Ukraine. *Acta Academiae Beregsiensis, Series Economics*, Issue 6 (2024) Volume 6. pp. 192–206. DOI: <https://doi.org/10.58423/2786-6742/2024-6-192-206> [in Ukrainian]
22. Spitsyna A.Ye., Halytskyi B.Yu., Lavryk H.I. Competitiveness of Transport Sector Enterprises under Conditions of Digital Transformation and European Union Policy. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Series: Economic Sciences*. 2025, No. 3(2). pp. 433–442. DOI: [https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-342-3\(1\)-63](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-342-3(1)-63) [in Ukrainian]
23. Shynkarenko V.H. Concept for Improving the Management of Competitiveness of Road Transport Enterprises. *Economics of the Transport Complex*. 2020, No. 36. pp. 95–112. DOI: <https://doi.org/10.30977/ETK.2225-2304.2020.36.0.95> [in Ukrainian]

24. Ustilovska A.S., Razdobriev V.M. Analysis of Competitiveness of Transport Enterprises as Employers. *Economic Space*. No. 197, 2025. pp. 292–296. DOI: <https://doi.org/10.30838/EP.197.292-296> [in Ukrainian]

25. Yankovyi O.H. Competitiveness of an Enterprise: Assessment Level and Directions for Improvement: Monograph. Odesa, 2013. 470 p. [in Ukrainian]

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ КОНКУРЕНТНОГО ПОТЕНЦІАЛУ АВТОТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ КРИЗИ ТА НЕСТАБІЛЬНОСТІ

Галицький Богдан Юрійович, аспірант кафедри економіки, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, galitskyi@ukr.net, tel.+380675380569
<https://orcid.org/0009-0007-5494-4962>

Спіцина Ангеліна Євгенівна, кандидат педагогічних наук, доцент, професор кафедри економіки, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, angel7a@ukr.net, tel.+380679053181
<https://orcid.org/0000-0001-9730-6249>

Анотація. У статті розглянуто та здійснено порівняльний аналіз сучасних методів оцінки і управління конкурентного потенціалу автотранспортного підприємства. Визначено наявні переваги та означено недоліки, що можуть призвести до неточності розрахунків. Сформульовано основні вимоги, яким повинна відповідати ефективна система оцінки конкурентоспроможності підприємства.

У сучасних реаліях українські автотранспортні підприємства зіткнулися з жорсткою конкуренцією як всередині країни, так і на закордонних ринках, які часто перенасичено високоякісними послугами та продукцією. Автомобільний транспорт займає одне з визначальних місць у транспортній системі країни. Основними чинниками, що визначають рівень конкурентоспроможності автотранспортного підприємства, є техніко-технологічний рівень, рівень кваліфікації персоналу та менеджменту, якість продукції та послуг, наявність ефективної стратегії маркетингу та збуту. Значних результатів автотранспортного підприємства на ринку можна досягти тільки тоді, якщо воно зможе досягти конкурентної переваги на ринку транспортних послуг, ґрунтуючись на найважливіших факторах успіху.

Економічна оцінка та діагностика конкурентоспроможності підприємств передбачає використання системи методологічних підходів, при яких диференціація, критерії, модельні показники визначають адекватність результатів з урахуванням специфіки конкурентного середовища. Проаналізовано та визначено, що серед методів оцінювання конкурентоспроможності підприємства при належному інформаційному забезпеченні найточнішою є параметрична (індикаторна, критеріальна) група методичних прийомів. При цьому об'єктивна оцінка конкурентоспроможності підприємств проводиться методами, в яких остаточним розрахунком є розрахунок інтегрального індексу конкурентоспроможності. Існують ефективні методи визначення конкурентної позиції компанії з урахуванням стратегічного потенціалу компанії, що дозволяє оцінити раціональність концепції стратегічного позиціонування суб'єкта господарювання в економічній системі. Враховуючи, що основною рисою конкурентоспроможності компанії є динаміка, рівень конкурентної позиції не можна вважати довгостроковою характеристикою конкурентного потенціалу підприємства, незважаючи на ефективність економічної та фінансової діяльності, ми пропонуємо використовувати матрицю (стратегічну) методів оцінки.

Ключові слова: конкурентний потенціал, конкурентна позиція, конкурентоспроможність, автотранспортне підприємство, методологічні підходи, оцінка, методики конкурентоспроможності підприємства, криза, нестабільність, Модель БКГ, метод Мак Кінсі, модель Shell/DPM, метод PIMS, модель Портера, чинники конкурентоспроможності підприємства, фактори конкурентоспроможності підприємства.

Перелік посилань

1. Арефєва О. В., Бабич С. М. Стратегічні аспекти управління конкурентоспроможністю підприємства в цифровому економічному просторі. *Конкурентоспроможність підприємств у міжнародному цифровому просторі* : монографія / за ред. О. В. Арефєвої. Київ : ФОП Маслаков, 2019. С. 7–14.
2. Базилюк В. Б., Світлицький В. А., Скарбарчук Т. В. Теоретичні аспекти формування підходу оцінки конкурентного потенціалу підприємства. *Наукові записки*. 2022. Вип. 2 (65). С. 131–136.
3. Балабанова І. В. Управління конкурентною раціональністю: теорія і методологія : автореф. дис. ... д-ра екон. наук : 08.00.04. Донецьк, 2009. 40 с.
4. Балабанова І. В. Конкурентний потенціал як основа формування конкурентних переваг. URL: http://www.rusnauka.com/3_ANRR_2009/Economics/38882.doc.htm.
5. Близнюк А. О. Конкурентоспроможність як показник ефективної роботи автотранспортних підприємств. *Економіка. Фінанси. Право*. 2023. № 9. С. 6–9. DOI: <https://doi.org/10.37634/efp.2023.9.1>.
6. Борисюк І. О., Мельник К. О. Управління конкурентоспроможністю автотранспортного підприємства. *Modern Economics*. 2018. № 12. С. 6–11. DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V12\(2018\)-01](https://doi.org/10.31521/modecon.V12(2018)-01).
7. Галицький Б. Ю. Роль конкурентного потенціалу у забезпеченні розвитку автотранспортного підприємства. *Економічний вісник Дніпровської політехніки*. 2024. № 1 (85). С. 161–170. URL: https://ev.nmu.org.ua/index.php/uk/archive?arh_article=1581.
8. Гудзинський О. Д., Судомир С. М., Гуренко Т. О. Управління формуванням конкурентоспроможного потенціалу підприємств (теоретико-методологічний аспект) : монографія. Київ : ІПК ДСЗУ, 2010. 212 с.
9. Дашко І. М. Дослідження основних методів оцінювання рівня конкурентоспроможності підприємств. *Економіка та держава*. 2020. № 5. С. 108–110. DOI: <http://10.32702/2306-6806.2020.5.108>.
10. Другова О. С. Оцінка конкурентного потенціалу підприємств машинобудування : автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.00.04. Харків : НТУ ХПІ, 2015. 22 с.
11. Карачина Н. П. Конкурентний потенціал та його роль у формуванні конкурентоспроможності підприємства. *Економічний простір*. 2014. № 86. С. 164–172.
12. Кваско А. В. Аналіз методів оцінки конкурентоспроможності підприємства. *Наукові записки*. 2017. № 1 (54). С. 111–118.
13. Кириченко О. М., Мігдальський А. В. Методи оцінювання конкурентоспроможності підприємства. *Ефективна економіка*. 2017. № 2. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5428>.
14. Кирчата І. М. Оцінка конкурентного потенціалу в системі управління конкурентоспроможністю підприємства : автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.00.04. Маріуполь, 2007. 20 с.
15. Коковіхіна О. О. Управління конкурентоспроможністю вагоноремонтних підприємств залізничного транспорту : автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.00.04. Харків, 2010. 20 с.
16. Конкурентний потенціал та його роль у формуванні конкурентоспроможності підприємства. URL: <http://inmad.vntu.edu.ua/portal/-static/CCAE8BAF-0B8A-42A9-A8C8-B65C4DABEC0A.pdf> (дата звернення: 15.08.2025).
17. Косар Н., Кузьо Н. Вплив війни на ринок автомобільних вантажних перевезень України та його подальший розвиток. *Вісник Львівського університету. Серія економічна*. 2023. Вип. 65. С. 14–23. URL: <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/economics/article/viewFile/12025/12383> (дата звернення: 10.08.2025).
18. Матвєєв В. В. Методи оцінки конкурентного потенціалу підприємства. *Ефективна економіка*. 2013. № 12. С. 123–129.

19. Сарай Н. І. Методологічні засади оцінки конкурентного потенціалу підприємства. *Економіка та управління підприємствами*. 2019. № 1. С. 97–103.
20. Семенова Т. В., Цесар К. Г. Методичні підходи до оцінки економічного зростання і розвитку підприємства. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2019. № 6 (23). С. 410–414. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/188-23>.
21. Складанівська О. Аналіз сучасного стану вантажних автотранспортних підприємств України. *Acta Academiae Beregsasiensis. Economics*. 2024. Вип. 6. С. 192–206. DOI: <https://doi.org/10.58423/2786-6742/2024-6-192-206>.
22. Спіцина А. Є., Галицький Б. Ю., Лаврик Г. І. Конкурентоспроможність підприємств транспортної галузі в умовах цифрової трансформації та політики Європейського Союзу. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2025. № 3 (2). С. 433–442. DOI: [https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-342-3\(1\)-63](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-342-3(1)-63).
23. Шинкаренко В. Г. Концепція вдосконалення управління конкурентоспроможністю автотранспортних підприємств. *Економіка транспортного комплексу*. 2020. № 36. С. 95–112. DOI: <https://doi.org/10.30977/ETK.2225-2304.2020.36.0.95>.
24. Устіловська А. С., Раздобреєв В. М. Аналіз конкурентоспроможності транспортних підприємств в якості роботодавця. *Економічний простір*. 2025. № 197. С. 292–296. DOI: <https://doi.org/10.30838/EP.197.292-296>.
25. Янковий О. Г. Конкурентоспроможність підприємства: оцінка рівня та напрями підвищення : монографія. Одеса : Атлант, 2013. 470 с.

Дата надходження до редакції 01.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 20.02.2026.

УДК 65. 012.7:656.02
UDC 65. 012.7:656.02

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-383-393

**СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ
В СИСТЕМАХ ЛОГІСТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ**

**SYSTEMATIZATION AND ASSESSMENT OF INFORMATION SECURITY RISKS
IN LOGISTICS SERVICE SYSTEMS**



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>



Дерегуз Ігор Андрійович здобувач PhD, Національний транспортний університет, e-mail: derehuz@ukr.net, тел. +380634321538,

<https://orcid.org/0000-0003-3119-3709>

Анотація. У статті розглядаються теоретичні та методичні аспекти оцінювання ризиків інформаційної безпеки в системах логістичного обслуговування, підходи до їх систематизації за рівнями ймовірності та наслідків, а також особливості встановлення причинно-наслідкових зв'язків між вразливостями та загрозами. Відповідно, систематизовано підходи до оцінювання ризиків за рівнями ймовірності та впливу на засоби контролю й керування операціями, а також сформовано перелік загрозливих подій, що впливають на досягнення бізнес-цілей транспортних систем. Розроблено механізм управління ризиками інформаційної безпеки, який ґрунтується на категорійній моделі причинно-наслідкових зв'язків між вразливостями та загрозами і передбачає використання матриці наслідків для їх оцінювання та групування.

Запропонований підхід апробовано на прикладі умовного транспортного підприємства «Таксіфай N», для якого визначено причинно-наслідкові зв'язки між загрозами і вразливостями, оцінено рівні ризиків та розроблено програму управління ними. Проведена перевірка узгодженості експертних оцінок (коефіцієнт конкордації 0,86) підтвердила надійність отриманих результатів. Оцінка ефективності впроваджених заходів засвідчила покращення показників управління ризиками (інтегральний показник ефективності – 0,64).

Ключові слова: управління та оцінювання ризиків, управління ризиком в системах логістичного обслуговування, процес оцінювання ризику, систематизація процесу оцінювання ризику, механізму управління ризиками інформаційної безпеки в системах транспортного обслуговування.

Вступ. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності управління ризиками інформаційної безпеки в системах логістичного обслуговування шляхом розроблення та практичної реалізації механізму їх оцінювання і управління з урахуванням причинно-наслідкових зв'язків між вразливостями та загрозами і впливу їх наслідків на функціонування транспортних систем.

Управління ризиками в системах логістичного управління є складним багатокомпонентним процесом, що охоплює широкий спектр теоретичних і прикладних аспектів, які потребують ґрунтовного опрацювання. Відповідно до методології ISO 31000, процес управління ризиками передбачає послідовну реалізацію таких етапів: визначення сфери застосування, контексту та критеріїв; оцінювання ризиків; їх оброблення; забезпечення збору даних і звітності; моніторинг та перегляд; а також комунікацію і консультації. Водночас етап оцінювання ризиків потребує подальшого вдосконалення, зокрема в частині підвищення об'єктивності результатів. Це може бути досягнуто шляхом систематизації процедур оцінювання ризиків і впровадження ефективного механізму управління ризиками інформаційної безпеки в системах логістичного обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Систематизація процесу оцінювання ризиків щодо інформаційної безпеки в системах транспортного обслуговування має базуватися на загальносистемних положеннях управління та оцінювання ризиків, які стосуються: оцінювання стійкості системи й рішень [1], диференціації показників важливості [2], їх мінливості і неточності, що впливає на оцінювання ризику; першочерговості оптимізації надійності [3], врахування чинників навколишнього середовища і соціальних чинників [4], а також розширення основ статистики для інтегрування загроз [5]; прояснення потенційної ролі теорії невизначеності у процесі аналізу ризику [6], концепції надійної його міри [7], особливо у виборі портфелів інфраструктурних проєктів [8]; можливості використання спрощеного підходу для управління ризику [9], методології визначення основних подій в їх оцінюванні [10], обговорення законодавчих когерентних заходів запобігання ризику [11]; питань етики, які пов'язані з прийнятністю ризику з позицій суспільства чи його складових [12], розуміння впливу на ризик бізнес-операції [13].

Для систематизації процесу оцінювання ризиків інформаційної безпеки системи надання транспортних послуг важливо охарактеризувати відповідні наслідки для кожної вразливості та загрози окремо для кожного активу [14]. При цьому необхідно оцінити імовірність ризику. Серйозність ризику являє собою загальне оцінювання як рівня ймовірності, що подія настане (імовірність), так і впливу події, якщо вона відбудеться (вплив).

Метою статті полягає у систематизації та вдосконаленні підходів до оцінювання ризиків інформаційної безпеки в транспортних логістичних системах шляхом розроблення та практичної реалізації механізму управління ризиками в системах транспортного обслуговування, який базується на встановленні причинно-наслідкових зв'язків між вразливостями та загрозами, оцінюванні ймовірності їх виникнення та рівня наслідків, а також формуванні обґрунтованих заходів реагування на основі матричного підходу.

Викладення основного матеріалу. Потенційна вразливість та/або загроза описується як: майже певна, ймовірна, можлива, малоімовірна, рідкісна (табл. 1) з відповідними рівнями впливу щодо загрозливої події (табл. 2).

Таблиця 1 – Рівні імовірності та їх характеристика, що загрозлива подія настане

Table 1 – Probability levels and their characteristics that a threatening event will occur

Рівні імовірності (I_r)		Характеристика імовірності
$I_{r,1}$	Майже впевнений (визначена)	Очікується у більшості випадків
$I_{r,2}$	Ймовірний	Ймовірно відбудеться у більшості випадків
$I_{r,3}$	Можливий	Може відбутись коли-небудь
$I_{r,4}$	Малоімовірний	Не очікується, але можливо відбудеться коли-небудь
$I_{r,5}$	Рідкісний	Не очікується і може відбутись за певних обставин

Наслідки інциденту інформаційної безпеки в системах транспортного обслуговування визначалися з точки зору втрати конфіденційності, цілісності та доступності. Кількісна оцінка впливу та визначення рівня ризику засновано на NIST SP 800–30, редакція 1 [15].

Таблиця 2 – Рівні впливу загрозової події, у випадку якщо вона настане

Table 2 – Impact levels of a threatening event, if it occurs

Рівні впливу	Опис впливу
Високий $H_{ir} \in [H_1; H_5]$	Втрата доступності, конфіденційності або цілісності виявляється значною, критичною, та/або негайно впливає на грошові потоки організації, операції, функціональність, юридичні, договірні зобов'язання та/або репутацію
Середній $M_{ir} \in [M_1; M_5]$	Втрата конфіденційності, доступності або цілісності може призвести до витрат та надати середнього або незначного впливу на юридичні, договірні зобов'язання та/або репутацію
Низький $L_{ir} \in [L_1; L_5]$	Втрата конфіденційності, доступності або цілісності не впливає на грошові втрати організації, юридичні, договірні зобов'язання та/або репутацію

Для оцінювання ідентифікованого ризику застосовують шкалу та матрицю рівнів ризику [16]. Підсумкове значення ризику R_i , визначається як добуток оцінки ймовірності реалізації загрози (тобто настання відповідної загрозової події) на величину наслідків (ефекту), пов'язаних із її виникненням:

$$R_i = G_{ir,i} \cdot E_{ir,i}, \quad (1)$$

де $g_{ir,i}$ – рейтинг, наданий ймовірності виникнення i -тої загрози (тобто настання відповідної загрозової події), як значущість загрози (відповідної загрозової події);

$E_{ir,i}$ – ефект, пов'язаний із i -ю загрозою (тобто настання відповідної загрозової події), як значущість загрози (відповідної ризикової події).

Повні оцінки чи рейтинги ризику можуть бути встановлені на основі вхідних даних про групи ймовірності та впливу загрози. Для цього будується матриця щодо оцінки (рівня) ризику (табл. 3) розміром $Y \times X$:

$$A = (R_{xy})_{x=1,y=1}^{X,Y} = \begin{pmatrix} R_{11} & \dots & R_{1Y} \\ \dots & R_{xy} & \dots \\ R_{X1} & \dots & R_{XY} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де x – вимірюється від 1 до X відносно рейтингу, наданому рівню впливу загрози (тобто відповідної загрозової події);

y – вимірюється від 1 до Y відносно ймовірності загрози (тобто настання відповідної загрозової події).

Матриця показує як визначаються загальні рівні ризику чи оцінки ризику. Визначення цих рівнів ризику чи оцінок ризику може бути суб'єктивним. Основа цього пояснення може бути виражена в термінах ймовірності, присвоєної кожному рівню ймовірності загрози (настання загрозової події), і значення, присвоєного кожному рівню впливу загрози (загрозової події).

Шкала для оцінки рівнів впливу встановлена у вигляді 15-бальної шкали щодо оцінювання для усіх рівнів впливу загрози (тобто настання відповідної загрозової події). Відповідно зазначені критерії були засновані на ISO 27005. Шкала оцінок для рівнів ймовірності встановлена у вигляді 5-бальної шкали оцінок: 0,20 – рідкісний, 0,40 – малоймовірний, 0,60 – можливий, 0,80 – ймовірний, 1,00 – впевнений (визначений). Обмеження по ризику встановлений на рівні 2,9.

Таблиця 3 – Матриця для визначення оцінок (рівня) ризику А

Table 3 – Matrix for determining risk ratings (levels) A

Рівні впливу загрози	$G_{ir,i}$	Рівні імовірності (I_r)				
		$I_{r,5}$	$I_{r,4}$	$I_{r,3}$	$I_{r,2}$	$I_{r,1}$
		$E_{ir,i}$				
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
H_5	15	3	6	9	12	15
H_4	14	2,8	5,6	8,4	11,2	14
H_3	13	2,6	5,2	7,8	10,4	13
H_2	12	2,4	4,8	7,2	9,6	12
H_1	11	2,2	4,4	6,6	8,8	11
M_5	10	2	4	6,0	8,0	10
M_4	9	1,8	3,6	5,4	7,2	9
M_3	8	1,6	3,2	4,8	6,4	8
M_2	7	1,4	2,8	4,2	5,6	7
M_1	6	1,2	2,4	3,6	4,8	6
L_5	5	1	2,0	3,0	4,0	5
L_4	4	0,8	1,6	2,4	3,2	4
L_3	3	0,6	1,2	1,8	2,4	3
L_2	2	0,4	0,8	1,2	1,6	2
L_1	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1

Матриця визначення оцінок (рівнів) ризику з її рейтингами характеризує рівень ризику, на який можуть наражатися інформаційна система, окрім активів та/або процесів за наявності відомої сприйнятливості та загрози. Для кращого розуміння слід користуватися рівнями наслідків та їх описом (табл. 4, 5).

Матриця наслідків загрози з урахуванням рівня ймовірності її настання представляє собою матриць розміром 5×5 , елементи якої подано у вигляді текстових характеристик; її формалізація може бути здійснена за допомогою теоретико-множинного опису:

$$B = \left\{ \begin{matrix} \{I_{r,1}, \dots, I_{r,5}\} \\ \{N_{r,1}, \dots, N_{r,5}\} \end{matrix} \right\} \quad (3)$$

де $I_{r,1} \dots I_{r,5}$ – рядки матриці, які відповідають рівням імовірності настання загрози (тобто відповідної загрозової події),);

$N_{r,1} \dots N_{r,5}$ – стовпчики матриці, які відповідають ступеню тяжкості настання загрози (тобто відповідної загрозової події), а саме наслідкам.

Отже, функція для реалізації методичного підходу до управління ризиками набуває формалізованого вигляду.:

$$f(R') = \{\sum V_{kj}, \sum T_{kj}, \sum R_i, \sum N_{r,i}\} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де V_{kj} – категорія j -тої вразливості k -того напрямку;

T_{kj} – j -та загроза k -того напрямку;

R_i – i -тий ризик;

$N_{r,i}$ – ступінь тяжкості настання події (наслідки).

Таблиця 4 – Матриця наслідків загрози (тобто настання відповідної загрозової події), відповідно до рівня імовірності її настання В.

Table 4 – Matrix of threat consequences (i.e. the occurrence of the relevant threatening event), according to the level of probability of its occurrence B.

Рівень імовірності настання загрозової події (I_r)	Ступінь тяжкості настання загрозової події (наслідки), $N_{r,i}$				
	незначна	середня	тяжка форма	підвищена	катастрофічна
$I_{r,1}$	посередній	високий	критичний	критичний	критичний
$I_{r,2}$	посередній	значний	високий	критичний	критичний
$I_{r,3}$	низький	посередній	значний	високий	критичний
$I_{r,4}$	низький	низький	посередній	значний	критичний
$I_{r,5}$	низький	низький	посередній	посередній	високий

Таблиця 5 – Опис рівнів щодо наслідків настання загрозової події відповідно до рівнів ймовірності за матрицею

Table 5 – Description of levels regarding the consequences of a threatening event according to the probability levels according to the matrix

Рівень наслідків настання загрозової події	Опис
Критичний	Надзвичайний ризик – потрібне глибоке дослідження, планування
Високий	Високий ризик – потрібне термінове реагування на ризик
Значний	Значний ризик – потрібна увага керівництва
Посередній	Посередній ризик – потрібно здійснити розподіл відповідальності
Низький	Низький ризик – вважати повсякденною подією

Управління ризиками в логістичному забезпеченні розповсюджується на сферу транспортного обслуговування [17]. До механізмів управління ризиком слід віднести чотири рівні: прийняття (низький рівень наслідків), зменшення (посередній рівень наслідків), передача (значний рівень наслідків) і видалення (високий або критичний рівень наслідків). Управління ризиками інформаційної безпеки в організації перевізника автомобільного транспорту в контексті рівнів управління ризиками можна представити наступним чином.

При роботі з ризиками першого рівня необхідно зарезервувати прийняття ризику для таких низькопріоритетних ризиків, коли інші варіанти заходів коштуватимуть більше, ніж потенційний вплив настання загрозової події. Для того щоб знизити виявлений ризик усі ризики повинні включати рекомендацію щодо засобів контролю та альтернативних рішень згідно із NIS2.

При роботі з ризиками другого рівня пом'якшення ризику передбачає мінімізацію ймовірності і/або наслідків настання загрозових подій або вразливостей. Запобіжні заходи проти ризику розглядаються ефективніші, ніж відновлення шкоди, заподіяної виявленням ризиком.

При роботі з ризиками третього рівня передбачається перенесення (передача) ризику, що передбачає перенесення негативного ефекту від загрозової події або вразливості. Передача ризику третій стороні назовні не усуває настання загрозової події або вразливості. Інша сторона нестиме відповідальність за опрацювання відповідного ризику.

При роботі з ризиками четвертого рівня запобігання ризику передбачає зміну аспектів спільних бізнес-процесів або системної архітектури для усунення загрозових подій – запобігання ризику

шляхом припинення пов'язаної з ним ділової активності. Для планування і розроблення майбутніх засобів контролю для усунення виявленого ризику можна застосовувати положення Директиву ЄС про кібербезпеку (NIS2).

Пропонований механізм управління ризиками інформаційної безпеки в системах транспортного обслуговування базується на моделі OCTAVE із подальшим удосконаленням, узгоджуючись із міжнародними стандартами управління ризиками [18]. Зазначене дозволяє реалізовувати ефективний експертний підхід при оцінюванні та управлінні ризиками. Реалізацію даного методу можна представити в рамках проходження наступних етапів:

На першому етапі встановлюється причинно-наслідкові зв'язки між вразливостями та загрозами і оцінювання їх ймовірності. На другому етапі здійснюється аналіз інформаційної системи та визначення впливу загрозової події. На третьому етапі проводиться оцінювання рівня ризику на основі ймовірності та впливу загрозової події. На четвертому етапі визначаються можливі наслідки загрозових подій. На п'ятому етапі формуються рекомендації щодо рівнів управління ризиками (прийняття, зниження, передача або уникнення ризику).

Розглянемо умови щодо реалізації механізму управління ризиками інформаційної безпеки в системах транспортного обслуговування. Ефективність розробленого механізму управління ризиками інформаційної безпеки в системах транспортного обслуговування була оцінена експертним методом на прикладі автотранспортної компанії «Таксіфай N». Відповідна зважена оцінка експертів рівня впливу ризикових подій та рівня ймовірності настання ризикових подій була оцінена із використанням матриць, наведеними в табл. 3, 4, та представлена у табл. 6.

Таблиця 6 – Оцінювання загроз (загрозових подій), рівнів їх ймовірності та наслідків для організації перевізника «Таксіфай N»

Table 6 – Assessment of threats (threat events), their probability levels and consequences for the organization of the carrier “Taxify N”

Загроза (загрозова подія)		Оцінка експертів	Рівень ймовірності	Рівень наслідків відносно рівня ризiku, R_i	Ступінь тяжкості настання загрозової події (наслідки)
1	2	3	4	5	6
T_{p2}	Помилки у використанні апаратних засобів та інформації	H_5	$I_{r,2}$	Високий, $R_i = 12$	Тяжка форма
T_{w3}	Вандалізм, крадіжка апаратних засобів, носіїв інформації чи документів	H_4	$I_{r,2}$	Високий, $R_i = 11,2$	Тяжка форма
T_{w4}	Протиправна передача інформації	H_3	$I_{r,3}$	Високий, $R_i = 7,8$	Підвищена
T_{n1}	Зловживання правом доступу	H_2	$I_{r,3}$	Високий, $R_i = 7,2$	Підвищена
T_{w5}	Не знищені залишки інформації, можливість її несанкціонованого використання	H_1	$I_{r,3}$	Високий, $R_i = 6,6$	Підвищена
T_{p2}	Розповсюдження комп'ютерних вірусів	M_5	$I_{r,2}$	Посередній, $R_i = 8,0$	Незначна

Продовження таблиці 6
Continuation of table 6

1	2	3	4	5	6
T_{n5}	Нанесення шкоди інформаційній мережі та програмному забезпеченні	M_4	$I_{r,2}$	Посередній, $R_i = 7,2$	Незначна
T_{p3}	Несанкціонована модифікація інформації	M_3	$I_{r,3}$	Посередній, $R_i = 4,8$	Середня
T_{n4}	Прослуховування	M_2	$I_{r,3}$	Посередній, $R_i = 4,2$	Середня
T_{n6}	Віддалене шпигунство	M_1	$I_{r,4}$	Низький, $R_i = 2,4$	Середня
T_{s4}	Можливість доступу сторонніх осіб	L_5	$I_{r,2}$	Значний, $R_i = 4,0$	Середня
T_{s3}	Відмови програмного забезпечення та доступу	L_4	$I_{r,4}$	Низький, $R_i = 2,4$	Незначна
T_{s6}	Помилки у використанні програмного забезпечення	L_3	$I_{r,3}$	Низький, $R_i = 1,2$	Незначна
T_{n7}	Несанкціоноване використання обладнання	L_2	$I_{r,4}$	Низький, $R_i = 0,8$	Незначна
T_{s2}	Можливість порушення правил доступу	L_1	$I_{r,5}$	Низький, $R_i = 0,2$	Незначна

Узгодженість думок експертів щодо впливу втрати конфіденційності, цілісності та доступності інформації була оцінена за методом конкордації, який детально описаний в дослідженні [19]. Значення коефіцієнта конкордації в $W=0,86$ підтверджує достовірність отриманих результатів.

Критерії оцінки ризику були встановлені для забезпечення загального розуміння заходів безпеки, які мінімізували б потенційний вплив до прийняттого рівня згідно з ISO 31000.

Відповідно до проведеної оцінки ризиків у відповідності до концептуальних засад управління ризиками інформаційної безпеки в системах транспортного обслуговування для організації перевізника автомобільного транспорту «Таксіфай N» у 2023 році було розроблено програму управління та пом'якшення ризиків. Згідно запропонованої програми «Таксіфай N» рекомендовано на першому рівні для загроз T_{n6} , T_{s3} , T_{s6} , T_{n7} , T_{s2} прийняти виявлений ризик. На другому рівні для загроз T_{p2} , T_{n5} , T_{p3} , T_{n4} «Таксіфай N» запропоновано виконати планування та розроблення майбутніх засобів контролю для усунення виявленого ризику. На третьому рівні для загрози T_{s4} «Таксіфай N» має розглянути всі варіанти передачі виявленого ризику іншим організаціям (наприклад, страховим). На останньому рівні запобігання ризику для загроз T_{p2} , T_{w3} , T_{w4} , T_{n1} , T_{w5} рекомендовано обрати відповідні цілі контролю, щоб знизити виявлені ризики та звести до мінімуму потенційний вплив на інформаційні системи «Таксіфай N» відповідно до правил додатку до ISO/IEC 27001.

Результати порівняння економічної діяльності організації до введення програми у 2022 р. та за результатами дії програми у 2023 р. були оцінені за допомогою аналізу економічної ефективності (CEA). Цей підхід ґрунтується на порівнянні показників ефективності різних років діяльності організації:

$$F = \frac{C_{t1} - C_{t2}}{E_{t2} - E_{t1}} = \frac{\Delta C}{\Delta E}, \quad (5)$$

де C – валові витрати організації;

E – валові доходи організації;

t_1 – період до введення програми управління ризиками інформаційної безпеки;

t_2 – період за результатами дії програми управління ризиками інформаційної безпеки.

Критерієм ефективності заходів є значення показника F більше від 0. Для організації «Таксіфай N» цей показник склав 0,64, що свідчить про ефективність запропонованої програми.

Висновок. Систематизовано процес оцінювання ризиків інформаційної безпеки в системах транспортного обслуговування за рівнями імовірності та впливу на засоби контролю й керування операціями. Сформовано перелік загрозливих подій, що можуть перешкоджати досягненню бізнес-цілей систем надання транспортних послуг, зокрема міського громадського транспорту. Запропоновано механізм управління ризиками інформаційної безпеки, який ґрунтується на категорійній моделі причинно-наслідкових зв'язків між вразливостями та загрозами й передбачає систематизацію оцінювання ризиків із підсумковим визначенням за матрицею наслідків. Відповідно, це дозволяє формувати заходи управління ризиками відповідно до груп наслідків; реалізація методу передбачає п'ять етапів. За обмеження до використання розробленого механізму виступає те, що у процесі його реалізації можуть виникнути певні перешкоди, які пов'язані із впровадженням ISO 27001, оскільки це потребує певної підтримки персоналу організації.

Таким чином, можливості використання запропонованого механізму управління ризиками інформаційної безпеки в системах транспортного обслуговування були оцінені експертним методом на прикладі умовної компанії перевізника автомобільного транспорту «Таксіфай N». Встановлено причинно-наслідкові зв'язки між вразливостями та загрозами (загрозливими подіями) в сфері інформаційної безпеки та виконана оцінка ймовірності виникнення потенційних загрозливих подій. Результати оцінювання засвідчили, що 5 ризиків мають високий рівень наслідків, 4 – посередній, 1 – значний, 5 – низький. Для «Таксіфай N» була запропонована програма управління ризиками, яка включала заходи для кожної групи виявлених загрозливих подій. Оцінки експертів були перевірені на узгодженість за методом конкордації, із розрахунковим коефіцієнтом в 0,86. Здійснена оцінка ефективності управління ризиками інформаційної безпеки для компанії перевізника автомобільного транспорту «Таксіфай N» за результатами впровадження свідчить про покращення результуючих показників. Зокрема, критерій ефективності щодо запропонованих і впроваджених відповідно до вищезгадуваної програми заходів має позитивне значення та складає 0,64.

Перелік посилань

1. Smerichevskiy, S., Mykhalchenko, O., Poberezhna, Z., Kryvovyazyuk, I. (2023). Devising a systematic approach to the implementation of innovative technologies to provide the stability of transportation enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (13 (123)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.279100>
2. Floreale, G., Baraldi, P., Lu, X., Rossetti, P., Zio, E. (2024). Sensitivity analysis by differential importance measure for unsupervised fault diagnostics. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109846. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109846>
3. Coit, D. W., Zio, E. (2019). The evolution of system reliability optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 192, 106259. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.09.008>
4. Sultana, S., Salon, D., Kuby, M. (2021). Transportation sustainability in the urban context: a comprehensive review. *Geographic Perspectives on Urban Sustainability*, 13–42. <https://doi.org/10.4324/9781003130185-2>
5. Shahjee, D., Ware, N. (2022). Integrated Network and Security Operation Center: A Systematic Analysis. *IEEE Access*, 10, 27881–27898. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3157738>
6. Dubois, D. (2010). Representation, Propagation, and Decision Issues in Risk Analysis Under Incomplete Probabilistic Information. *Risk Analysis*, 30 (3), 361–368. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01359.x>

7. Fertis, A., Baes, M., Lthi, H.-J. (2012). Robust risk management. *European Journal of Operational Research*, 222 (3), 663–672. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.03.036>
8. Joshi, N. N., Lambert, J. H. (2011). Diversification of infrastructure projects for emergent and unknown non-systematic risks. *Journal of Risk Research*, 14 (6), 717–733. <https://doi.org/10.1080/13669877.2011.553733>.
9. Maselli, G., Macchiaroli, M. (2020). Tolerability and Acceptability of the Risk for Projects in the Civil Sector. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 686–695. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48279-4_64
10. Reinert, J. M., Apostolakis, G. E. (2006). Including model uncertainty in risk-informed decision making. *Annals of Nuclear Energy*, 33 (4), 354–369. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2005.11.010>
11. Shapiro, A. (2013). On Kusuoka Representation of Law Invariant Risk Measures. *Mathematics of Operations Research*, 38 (1), 142–152. <https://doi.org/10.1287/moor.1120.0563>
12. Vanem, E. (2012). Ethics and fundamental principles of risk acceptance criteria. *Safety Science*, 50 (4), 958–967. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.12.030>
13. Zsidisin, G.A. (2003). A grounded definition of supply risk. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 9 (5-6), 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2003.07.002>
14. Andersson, A., Hedstrm, K., Karlsson, F. (2022). Standardizing information security – a structural analysis. *Information & Management*, 59 (3), 103623. <https://doi.org/10.1016/j.im.2022.103623>
15. The NIST Cybersecurity Framework 2.0 (2023). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/nist.cswp.29.ipd>
16. Kitsios, F., Chatzidimitriou, E., Kamariotou, M. (2022). Developing a Risk Analysis Strategy Framework for Impact Assessment in Information Security Management Systems: A Case Study in IT Consulting Industry. *Sustainability*, 14 (3), 1269. <https://doi.org/10.3390/su14031269>
17. Мельниченко, О.І., Ігнатенко, О.С., Дмитриченко А.М. (2023). Логістичне управління системою надання транспортних послуг населенню: антикризовий аспект. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*, Випуск 1 (55), С.200–210. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-200-210>
18. Добровольська А., Добровольський О., Дерезуз І. Розробка науково-методичного підходу до систематизації процесу оцінювання ризику в системах логістичного обслуговування // *Multidisciplinárni mezinárodní vědecký magazín “Věda a perspektivy” je registrován v České republice. Státní registrační číslo u Ministerstva kultury ČR: E 24142. № 9(52) 2025. str. 185-196.* [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-9\(52\)-185-196](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-9(52)-185-196)
19. Khrutba, V., Kharchenko, A., Khrutba, Y., Kolbasin, M., Tsybulskyi, V., Silantieva, I., & Lysak, R. Applying a design mindset to develop a prototype of an electronic service for assessing the impact on the environment // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. Vol. 4. No. 2 (118), P. 6-15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262356>

SYSTEMATIZATION AND ASSESSMENT OF INFORMATION SECURITY RISKS IN LOGISTICS SERVICE SYSTEMS

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>

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>

Summary.

The relevance of the study is due to the need to increase the effectiveness of information security risk management in logistics service systems by developing and practical implementation of a mechanism for their

assessment and management, taking into account the cause-and-effect relationships between vulnerabilities and threats and the impact of their consequences on the functioning of transport systems.

The purpose of the article is to systematize and improve approaches to assessing information security risks in transport logistics systems by developing and practical implementation of a risk management mechanism in transport service systems, which is based on establishing cause-and-effect relationships between vulnerabilities and threats, assessing the probability of their occurrence and the level of consequences, as well as forming justified response measures based on a matrix approach.

The article considers theoretical and methodological aspects of assessing information security risks in logistics service systems, approaches to their systematization by levels of probability and consequences, as well as the features of establishing cause-and-effect relationships between vulnerabilities and threats.

A mechanism for managing information security risks in logistics service systems is proposed, which is based on a categorical model of relationships between threats and vulnerabilities, involves the use of a matrix of consequences for assessing risks and developing justified measures to minimize them, and is also tested on the example of a transport enterprise. Based on the results of the assessment, the distribution of risks by significance levels is determined and response measures are developed. The effectiveness of the proposed approach is confirmed by the consistency of expert assessments and the improvement of the integral indicator of risk management effectiveness.

Key words: risk management and assessment, risk management in logistics service systems, risk assessment process, systematization of the risk assessment process, information security risk management mechanism in transport service systems.

References

1. Smerichevskiy, S., Mykhalchenko, O., Poberezhna, Z., Kryvovyazyuk, I. (2023). Devising a systematic approach to the implementation of innovative technologies to provide the stability of transportation enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (13 (123)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.279100>
2. Floreale, G., Baraldi, P., Lu, X., Rossetti, P., Zio, E. (2024). Sensitivity analysis by differential importance measure for unsupervised fault diagnostics. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109846. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109846>
3. Coit, D. W., Zio, E. (2019). The evolution of system reliability optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 192, 106259. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.09.008>
4. Sultana, S., Salon, D., Kuby, M. (2021). Transportation sustainability in the urban context: a comprehensive review. *Geographic Perspectives on Urban Sustainability*, 13–42. <https://doi.org/10.4324/9781003130185-2>
5. Shahjee, D., Ware, N. (2022). Integrated Network and Security Operation Center: A Systematic Analysis. *IEEE Access*, 10, 27881–27898. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3157738>
6. Dubois, D. (2010). Representation, Propagation, and Decision Issues in Risk Analysis Under Incomplete Probabilistic Information. *Risk Analysis*, 30 (3), 361–368. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01359.x>
7. Fertis, A., Baes, M., Lthi, H.-J. (2012). Robust risk management. *European Journal of Operational Research*, 222 (3), 663–672. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.03.036>
8. Joshi, N. N., Lambert, J. H. (2011). Diversification of infrastructure projects for emergent and unknown non-systematic risks. *Journal of Risk Research*, 14 (6), 717–733. <https://doi.org/10.1080/13669877.2011.553733>
9. Maselli, G., Macchiaroli, M. (2020). Tolerability and Acceptability of the Risk for Projects in the Civil Sector. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 686–695. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48279-4_64
10. Reinert, J. M., Apostolakis, G. E. (2006). Including model uncertainty in risk-informed decision making. *Annals of Nuclear Energy*, 33 (4), 354–369. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2005.11.010>

11. Shapiro, A. (2013). On Kusuoka Representation of Law Invariant Risk Measures. *Mathematics of Operations Research*, 38 (1), 142–152. <https://doi.org/10.1287/moor.1120.0563>
12. Vanem, E. (2012). Ethics and fundamental principles of risk acceptance criteria. *Safety Science*, 50 (4), 958–967. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.12.030>
13. Zsidisin, G.A. (2003). A grounded definition of supply risk. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 9 (5-6), 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2003.07.002>
14. Andersson, A., Hedstrm, K., Karlsson, F. (2022). Standardizing information security – a structural analysis. *Information & Management*, 59 (3), 103623. <https://doi.org/10.1016/j.im.2022.103623>
15. The NIST Cybersecurity Framework 2.0 (2023). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/nist.cswp.29.ipd>
16. Kitsios, F., Chatzidimitriou, E., Kamariotou, M. (2022). Developing a Risk Analysis Strategy Framework for Impact Assessment in Information Security Management Systems: A Case Study in IT Consulting Industry. *Sustainability*, 14 (3), 1269. <https://doi.org/10.3390/su14031269>
17. Melnichenko, O., Ignatenko, O., Dmytrychenko, A., Derehuz, I. (2023). Logistics management of the system for providing transportation services to the population: anti-crisis aspect. *The National Transport University Bulletin*, 1 (55). <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-200-210> [in Ukrainian]
18. Dobrovolska A., Dobrovolskiy O., Derehuz I. Development of a scientific-methodical approach to the systematization of the risk assessment process in logistics service systems // *Multidisciplinárni mezinárodní vědecký magazín “Věda a perspektivy” je registrován v České republice. Státní registrační číslo u Ministerstva kultury ČR: E 24142. № 9(52) 2025. str. 185-196.* [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-9\(52\)-185-196](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-9(52)-185-196)
19. Khrutba, V., Kharchenko, A., Khrutba, Y., Kolbasin, M., Tsybulskyi, V., Silantieva, I., & Lysak, R. Applying a design mindset to develop a prototype of an electronic service for assessing the impact on the environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. Vol. 4. No. 2 (118), P. 6-15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262356>

Дата надходження до редакції 10.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 21.02.2026.

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ СТЕЙКХОЛДЕРІВ
МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПРОЄКТУ ТРАНСПОРТНОГО ПІДПРИЄМСТВАCONCEPTUAL MODEL OF STAKEHOLDER ENGAGEMENT IN A MULTIMODAL
TRANSPORT ENTERPRISE PROJECTS

Литвишко Лілія Олександрівна, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: l.lytvyshko@ntu.edu.ua, тел. +380442808438

<https://orcid.org/0000-0001-9315-046X>



Кравчук Іван Васильович, здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти кафедри менеджменту за спеціальністю 073 «Менеджмент», Національний транспортний університет, Київ, Україна e-mail: kravchukivan22@ukr.net, тел. +380442808438

<https://orcid.org/0009-0007-2540-4625>

Анотація. У сучасних умовах, управління транспортними проєктами, потребує нових підходів до взаємодії зі стейкхолдерами, оскільки традиційні інструменти не забезпечують належної узгодженості в умовах складності, динамічності та політичних ризиків.

Відсутність інтегрованих моделей взаємодії, недостатня локалізація європейських стандартів в українських реаліях, брак кількісних методів оцінювання довіри й прозорості ускладнюють ефективне управління транспортними ініціативами. Тому, необхідним є розробка концептуальної моделі взаємодії зі стейкхолдерами транспортних проєктів на основі екосистемного та поліцентричного підходів, яка буде поєднувати формальні, неформальні та цифрові механізми координації.

На основі дослідження розроблено концептуальну модель екосистеми, що інтегрує інституційний, організаційний, соціальний і цифровий виміри управління. Визначено основні принципи (прозорість, взаємовигідність, відповідальність, інклюзивність), окреслено канали комунікації (цифрові платформи, консультації, робочі групи) та механізми координації (регламенти, довіра, інноваційні цифрові інструменти). Запропонована модель показує, як поєднання державних, бізнесових, соціальних і міжнародних партнерів знижує транзакційні витрати та підвищує стійкість проєктів транспортних підприємств. Розроблена модель формує основу для практичної імплементації системи управління взаємодією зі стейкхолдерами транспортних проєктів. Подальші дослідження передбачають зосередження на формалізації взаємодій шляхом розроблення математичних моделей із використанням багатокритеріального аналізу, соціального мережевого аналізу та симуляційних DSS-систем, що дозволить перейти від якісних описів до кількісної оцінки впливів і ризиків.

Ключові слова: мультимодальний транспортний проєкт, управління проєктами, стейкхолдери, концептуальна модель, екосистема, мережеве врядування, поліцентричне врядування, цифрова інтеграція, інтероперабельність, управління взаємодією, сталий розвиток, прийняття управлінських рішень, стратегічні орієнтири.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних транспортних систем відбувається в умовах зростаючої складності організаційних структур, розширення масштабів інтеграції та посилення вимог до ефективності логістичних процесів. Особливої уваги ці питання набувають у сфері мультимодальних перевезень, де в єдиному транспортному ланцюзі поєднуються різні види транспорту (залізничний, автомобільний, морський, авіаційний), численні інфраструктурні об'єкти (порти, термінали, склади, прикордонні переходи), а також значна кількість стейкхолдерів – від державних регуляторних органів до приватних перевізників, інвесторів, клієнтів і місцевих громад. Така багатовекторність зумовлює потребу в створенні спеціальних моделей координації, здатних інтегрувати інституційний, організаційний і цифровий виміри управління.

Аналіз і огляд останніх досліджень. Класичні підходи до аналізу взаємодії зі стейкхолдерами сформувалися в межах корпоративного управління та стратегічного менеджменту. Зокрема, концепція R. Freeman визначила зацікавлені сторони як групи або індивідів, які можуть впливати на досягнення цілей організації або зазнавати впливу від її діяльності [1]. Ця парадигма стала фундаментальною для подальших досліджень, проте її застосування в умовах мультимодальних транспортних систем має обмеження. Традиційні інструменти - матриці «влада/інтерес», карти стейкхолдерів тощо - не враховують поліцентричної природи управління у складних транскордонних мережах. Виникає розрив між теоретичними моделями та практичними потребами координації в інфраструктурних мегапроєктах, де взаємодіють десятки різних партнерів із суперечливими цілями.

Європейський досвід демонструє, що мультимодальні перевезення неможливо ефективно організувати без екосистемного підходу. Дослідження Крамарж та ін. [2] доводять, що у прикордонних регіонах, навіть за умов зрілих інституційних рамок, учасники формують складну мережу з численними горизонтальними й вертикальними зв'язками. Відсутність інтегрованих механізмів призводить до зростання транзакційних витрат, затримок на стиках видів транспорту, низької передбачуваності ланцюгів постачання. У таких системах класичні інструменти управління виявляються недостатніми, а ефективність забезпечує лише моделювання екосистеми взаємодії.

Не менш важливим є врахування специфіки мегапроєктів транспортної інфраструктури. Як зазначають Еркул, Йітмен і Ардіті [3], масштабні інфраструктурні ініціативи завжди супроводжуються високим рівнем невизначеності, політичною чутливістю та конфліктністю. Стейкхолдери часто мають протилежні інтереси, що ускладнює ухвалення рішень. У таких умовах, критично необхідними стають раннє залучення зацікавлених сторін, прозорі механізми консультацій та структуровані процеси врегулювання конфліктів. Відсутність цілісної моделі комунікації призводить до затягування проєктів, перевищення бюджетів і виникнення соціального опору.

Додатковим чинником є цифровізація управління транспортом. Регламент ЄС 2020/1056 (eFTI) [4] встановлює вимоги до електронного обміну інформацією у сфері вантажних перевезень, створюючи нормативне підґрунтя для цифрових платформ, сумісних між усіма учасниками. Таким чином, цифрова інтеграція перестає бути факультативним інструментом і стає регуляторною необхідністю. Для України, яка прагне інтеграції у європейський транспортний простір, це означає, що будь-яка модель управління стейкхолдерами має поєднувати інституційний дизайн із цифровою архітектурою обміну даними.

Вітчизняний контекст підсилює актуальність проблеми. «Національна транспортна стратегія України до 2030 року» [5] визначає інтеграцію до європейської транспортної мережі, підвищення ефективності та цифрову трансформацію як стратегічні орієнтири. В умовах післявоєнного відновлення ці завдання набувають особливої ваги: Україна потребує залучення масштабних інвестицій у транспортну інфраструктуру, ефективної взаємодії з міжнародними фінансовими організаціями, прозорого партнерства з бізнесом і врахування соціальних чинників у реалізації

проектів. Відсутність узгодженої концептуальної моделі взаємодії стейкхолдерів створює ризики затримок, конфліктів і втрат довіри.

Отже, постановка задачі полягає у розробленні концептуальної моделі (екосистеми) взаємодії стейкхолдерів мультимодального проекту, яка:

- систематизує ролі, інтереси та зони відповідальності основних учасників;
- формалізує механізми координації та врегулювання конфліктів;
- забезпечує інтеграцію цифрових інструментів обміну даними відповідно до міжнародних стандартів;
- створює умови для моніторингу прозорості, ефективності й соціальної прийнятності проектів.

Розв'язання цієї проблеми дозволить знизити транзакційні витрати, мінімізувати ризики затримок і протестів, а також підвищити рівень довіри між бізнесом, державою, інвесторами та громадами. Концептуальна модель екосистеми стане необхідним інструментом для забезпечення ефективної інтеграції України у європейський транспортний простір.

Матеріали та методи. В статті використано аналіз міжнародних практик і нормативних документів ЄС (TEN-T, eFTI, ISO 44001, ISO 21502), методологічні підходи мережевого та поліцентричного врядування, а також узагальнення кейсів інфраструктурних мегапроектів.

Метою роботи є розроблення та обґрунтування комплексної концептуальної моделі (екосистеми) взаємодії стейкхолдерів мультимодальних транспортних проектів, яка забезпечує ефективну координацію, цифрову інтеграцію та соціальну прийнятність на основі принципів мережевого й поліцентричного врядування.

Об'єкт дослідження – процеси управління взаємодією стейкхолдерів у мультимодальних транспортних проектах, що охоплюють багаторівневу систему учасників (державні органи, бізнес, інвестори, громади, міжнародні партнери) та забезпечують узгодженість рішень у сфері планування, реалізації й експлуатації транспортної інфраструктури.

Предмет дослідження – концептуальна модель (екосистема) взаємодії стейкхолдерів мультимодальних транспортних проектів, яка включає архітектуру ролей і відповідальностей, механізми мережевого й поліцентричного врядування, цифрову інтероперабельність (eFTI, DTLF, PCS, стандарти ISO), а також соціальні механізми забезпечення прийнятності (SLO).

Виклад основного матеріалу. Засаднича парадигма управління стейкхолдерами від R.E. Freeman окреслює зацікавлені сторони як групи/осіб, що можуть впливати на досягнення цілей організації або зазнавати впливу її діяльності. Цей підхід створив основу для подальших інструментів картування, пріоритезації та комунікації зі стейкхолдерами, однак у класичній версії орієнтувався переважно на межі однієї фірми й відносно стабільні середовища [1]. Подальша формалізація відбулася через модель салентності (power – legitimacy – urgency) Мітчелла, Егла та Вуда, що визначає, чиї вимоги «справді мають значення» в умовах ресурсних і часових обмежень управління. Для мегапроектів (з високою політичною чутливістю та багаторівневим впливом) ця тріада стала практичним апаратом для динамічної оцінки «видимості» стейкхолдерів у різні моменти життєвого циклу [6]. Значний внесок у динамічну інтерпретацію салентності зробили дослідження Аалтонена і Куяли, які показали, як зацікавлені сторони змінюють стратегії впливу протягом фаз проекту; для глобальних (транскордонних) ініціатив це особливо істотно [7].

У методологічному вимірі застосовуються як класичні матриці «влада/інтерес», так і багатокритеріальні підходи (ANP/AHP), а також соціальний мережевий аналіз (SNA), який дозволяє вимірювати структурну позицію учасника (центральність, посередництво, щільність зв'язків) і проектувати механізми координації саме під мережеву топологію системи. Наукові погляди Ріда та співавторів систематизують типологію методів аналізу стейкхолдерів і підкреслюють, що вибір методу має бути узгоджений із ціллю участі (інформування, консультування, співуправління) й фазою ініціативи, а не лише зі «зручністю» інструменту [8]. У будівельних та інфраструктурних проектах відомою є модель Stakeholder Impact Index Оландера, яка оцінює силу впливу та ймовірність його реалізації, а також позицію стейкхолдера (прибічник/опонент), що корисно для попередження

конфліктів на стиках видів транспорту [9].

Мегапроекти (вартістю від \$1 млрд, з багаторічними циклами та багаторівневими стейкхолдерами) відомі «залізним законом»: «over budget, over time, under benefits - over and over again». Узагальнення Б. Флявб'єрга демонструють стійку статистику перевищення бюджетів і строків, що пояснюється комбінацією політичної й оптимістичної упередженості, а також інституційними стимулами «виживання найменш придатних» (survival of the unfittest) [10]. У такому контексті якість взаємодії та врегулювання між державою, бізнесом, громадами та інвесторами стає ключовим фактором результативності; емпіричні дослідження залучення стейкхолдерів у мегатранспортних проєктах підтверджують потребу в ранніх консультаціях, прозорій комунікації та механізмах медіації суперечностей протягом усього життєвого циклу ініціативи [3].

Це напряму веде до парадигми мережевого врегулювання. Класична типологія Провена й Кеніса окреслює три базові режими - *shared governance*, *lead organization* та *network administrative organization* (NAO) - і відповідні контингентні умови їх ефективності (розмір мережі, довіра, потреба в централізації/легітимації) [11]. Для мультимодальних екосистем, де коекзистують державні органи, оператори інфраструктури, перевізники, термінали, IT-платформи й місцеві громади, вибір та гібридизація режимів є практично неминучими. Паралельно розвивається колаборативне врегулювання (Ansell & Gash), яке пропонує процесну модель від стартових умов через будівництво довіри, спільне розуміння та проміжні «маленькі перемоги» до інституціоналізації співпраці - критично важливо для конфліктних і транскордонних коридорів [12]. Теоретично ці підходи корелюють із поліцентричним врегулюванням (Е. Остром), де множинні центри прийняття рішень взаємодіють на різних рівнях (локальному, регіональному, національному/наднаціональному) - саме так функціонують TEN-T та регіональні логістичні мережі [13].

Мультимодальність розглядається у транспортній географії як ланцюг послідовних мод із критичною роллю терміналів (морські порти, сухі порти/інленд-термінали, інтермодальні хаби). Комплексні праці Родріґа й Ноттебума демонструють, що системна ефективність забезпечується не лише інфраструктурою, а насамперед узгодженістю інтерфейсів і практик на стиках - операційних, комерційних та інформаційних [14]. Надмірні транзакційні витрати й невідповідність процедур на «стику» часто є джерелом затримок і втрат надійності ланцюгів. Сучасні огляди щодо інленд-терміналів (сухих портів) підтверджують, що їхня мережна роль (від «сателітних» до «ворітних»), пов'язана з інтеграцією даних і сервісів, прямо впливає на перерозподіл потоків і зниження навантаження у вузлах [2].

Під мультимодальним проєктом транспортного підприємства будемо розуміти інфраструктурно-управлінську систему, що поєднує різні види транспорту, цифрові технології та механізми координації між державою, бізнесом і громадами. Такі проєкти формують екосистему перевезень, яка відповідає міжнародним стандартам (ISO 17185:2014, eFTI) та практикам інтегрованої логістики [15; 16].

На мікрорівні екосистемний підхід до мультимодалу добре ілюстрований дослідженнями щодо стейкхолдерів у транскордонних регіонах (Польща-Чехія-Словаччина), де автори виділяють широке коло учасників і горизонтальні/вертикальні зв'язки між ними, наполягаючи на необхідності цілісної концептуалізації «екосистеми» для узгодження ролей, інтересів і зон відповідальності [2].

Цифровізація взаємодії: eFTI, DTLF, федеративний обмін і PCS. Цифрова інтеграція в логістиці переходить із добровільної у регуляторну необхідність. Регламент (ЄС) 2020/1056 (eFTI) встановлює правові рамки, за яких економічні оператори можуть подавати регуляторну інформацію в електронному форматі та вимоги до платформ/провайдерів для забезпечення сумісності й прийнятності даних органами контролю на всіх видах транспорту (дорога, залізниця, внутрішні водні шляхи, авіа) [4]. У практичній імплементації ключову роль відіграє Digital Transport and Logistics Forum (DTLF) - експертна група ЄК, яка координує підготовку технічних специфікацій eFTI і підходів до федеративного обміну даними між різними платформами/акторами (Sub-Group 1 - eFTI, Sub-Group 2 - федерація платформ) [18]. Ряд ініціатив CEF (наприклад, FEDeRATED) створюють інтероперабельні «шлюзи»/референс-архітектури для децентралізованого обміну без створення монолітних дата-озер,

що узгоджується з вимогами довіри, ідентифікації та сертифікації провайдерів даних [17].

У морських і повітряних вузлах важливою опорною інституцією стають Port Community Systems (PCS) - нейтральні платформи для безпечного обміну даними між приватними й публічними суб'єктами (портові адміністрації, митниця, лінії, експедитори тощо). Класичні документи IPCSA та нові Рекомендації ІМО (FAL.5/Circ.54, 2024) закріплюють роль PCS як інструменту інтеграції в Single Window та цифрового ланцюга документів/подій, що знижує транзакційні витрати і підвищує прогнозованість потоків [19; 20]. Комплексні огляди ЕУ-проектів (BOOSTLOG) констатують зсув від пілотів до масштабованих кейсів обміну даними і пропонують дорожні карти зрілості для логістичних даних (інвентаризація практик, прогалини, тренди) - критичні для реальної роботи регуляторики eFTI в коридорах і вузлах [17].

Цифрова інтеграція корелює з процесними і поведінковими стандартами управління відносинами. ISO 44001:2017 задає життєвий цикл *collaborative business relationships* (від «operational awareness» до «exit strategy»), що напряду застосоване до довготривалих державно-приватних/міжорганізаційних партнерств у мультимодалі [19]. На рівні методології проектного управління релевантні ISO 21502:2020 (гайд із управління проектами) та РМВОК, які забезпечують спільну «мову» між учасниками екосистеми при інтеграції цифрових сервісів у керування результатами проекту [20; 21].

Соціальна прийнятність і «соціальна ліцензія на діяльність» у транспорті. Для інфраструктурних ініціатив із локально концентрованими впливами (будівництво вузлів, терміналів, об'їздів) дедалі частіше застосовується поняття соціальної ліцензії на діяльність (SLO). Узагальнення Моффат і Чжан показують, що траєкторія до «ліцензії» проходить через довіру, справедливість процедур і відчутну відповідальність оператора; при цьому SLO - не формальна, а динамічна категорія, що вимагає постійного підтримання через комунікацію і спільні рішення з громадами [20]. Аналіз літературних джерел з інфраструктури транспортного ринку підкреслює, що невизначеність вимог SLO може як допомагати інституціонувати кращі стандарти взаємодії і стейкхолдерами, так і породжувати ризики «нескінченних погоджень», якщо не вбудована у формальні процеси оцінки впливів та управління ризиками [20]. Для мультимодальних перевезень, це означає потребу в прозорих, повторюваних процедурах участі та зобов'язаннях (commitment tracking) в архітектурі екосистеми.

Розглядаючи політику та нормативні рамки ЄС і України, важливим є Європейський каркас TEN-T у редакції Регламенту (ЄС) 2024/1679. Він закріплює багаторівневу структуру мережі (core/extended core/comprehensive), нові горизонтальні пріоритети й часові періоди (2030/2040/2050), а також інтеграцію вузлів і коридорів для безшовної мультимодальності [22]. Це зміщує акцент із «проекту-в-собі» до екосистемних зв'язків між операторами, регуляторами та цифровими інтерфейсами, зокрема, в міських вузлах і на стиках міжнародних коридорів [18]. У цифровому вимірі TEN-T комплементарний до eFTI і DTLF, задаючи мережеві вимоги до взаємодії інфраструктури та бізнес-процесів.

Для України «Національна транспортна стратегія до 2030 року» фіксує цілі інтеграції до європейської мережі, підвищення ефективності перевезень, цифрову трансформацію та безпеку - що робить розроблення екосистемної моделі взаємодії зі стейкхолдерами не академічною вправою, а практичною умовою залучення інвестицій і синхронізації її з ЄС [5]. Дослідження міжнародних партнерів (Світовий банк) підсилюють це бачення, акцентуючи увагу на мультимодальному зсуві, «зеленій» трансформації, цифрових коридорах - як драйвери стійкості та конкурентоспроможності.

Узагальнена аналітична таблиця 1 дає змогу представити нормативно-правові та стратегічні рамки, що визначають розвиток мультимодальної транспортної системи України в контексті інтеграції до європейської мережі TEN-T. Це дозволяє проаналізувати, яким чином наднаціональні вимоги трансформуються у внутрішню політику та призводять до змін у взаємодії між стейкхолдерами (державними структурами, бізнесом, громадами й міжнародними партнерами).

Таблиця 1 – Нормативно-правові та стратегічні рамки України в контексті TEN-T**Table 1** – The legal and strategic framework of Ukraine in the context of TEN-T

Елемент / документ	Основні положення	Вплив на екосистему стейкхолдерів
TEN-T (Регламент ЄС 2024/1679)	Багаторівнева структура (core, extended core, comprehensive). Чіткі часові горизонти (2030/2040/2050). Інтеграція коридорів і вузлів для безшовної мультимодальності.	Формує поліцентричну архітектуру управління транспортними коридорами. Вимагає міжсекторальної та міждержавної координації. Підсилює роль цифрової інтеграції (eFTI, DTLF).
DTLF (Digital Transport and Logistics Forum)	Розробка технічних специфікацій eFTI. Механізми федеративного обміну даними. Координація платформ і провайдерів.	Встановлює правила цифрової взаємодії між акторами екосистеми. Підвищує прозорість і відстежуваність ланцюгів постачання. Знижує транзакційні витрати для стейкхолдерів.
Національна транспортна стратегія України до 2030	Інтеграція до TEN-T. Цифрова трансформація транспорту. Підвищення безпеки та ефективності перевезень.	Вимагає адаптації європейських стандартів до українських умов. Стимулює розвиток національних цифрових платформ та інтеграцію з EU-системами. Визначає роль держави як фасилітатора екосистеми.
Дослідження Світового банку	Акцент на «зелену» економіку. Орієнтація на мультимодальні коридори. Підтримка цифрових інновацій.	Посилює значення сталого розвитку у транспортній політиці. Підтримує інвестиційні рішення, орієнтовані на екологію та інновації. Зміщує акценти до публічно-приватного партнерства

На рисунку 1 представлено стрілкова діаграма «TEN-T → Україна → екосистема», яка візуалізує ієрархію та напрямки впливу нормативних і стратегічних документів на систему управління мультимодальними проектами. Маємо логічний ланцюг: від європейського регламенту TEN-T як наднаціональної рамки → через національну транспортну стратегію України як механізм локалізації → до екосистеми стейкхолдерів, де відбувається практична реалізація вимог. Це дає змогу наочно підкреслити, що кінцевою точкою усіх нормативних і політичних змін є саме практична взаємодія учасників екосистеми - держави, бізнесу, громад і міжнародних партнерів.

Проведений аналіз наукових робіт свідчить, що у сфері дослідження взаємодії зі стейкхолдерами мультимодальних проектів уже склалися певні консенсусні положення, які визнаються більшістю дослідників. Водночас залишаються дискусійними питання (лакуни), що обмежують практичну імплементацію інтегрованих моделей управління. У таблиці 2 наведено узагальнення основних консенсусних позицій і наукових дискусійних питань, які потребують подальшого опрацювання.

Сучасні мультимодальні транспортні проекти характеризуються високим рівнем складності, оскільки поєднують велику кількість учасників, інституцій, технологій та територіальних юрисдикцій. У таких умовах традиційні інструменти управління виявляються недостатніми для забезпечення узгодженості інтересів і координації їх дій. Саме тому виникає потреба у розробленні концептуальної моделі, яка б відображала багатовимірний характер екосистеми стейкхолдерів і дозволяла системно вирішувати проблеми управління транспортними підприємствами.

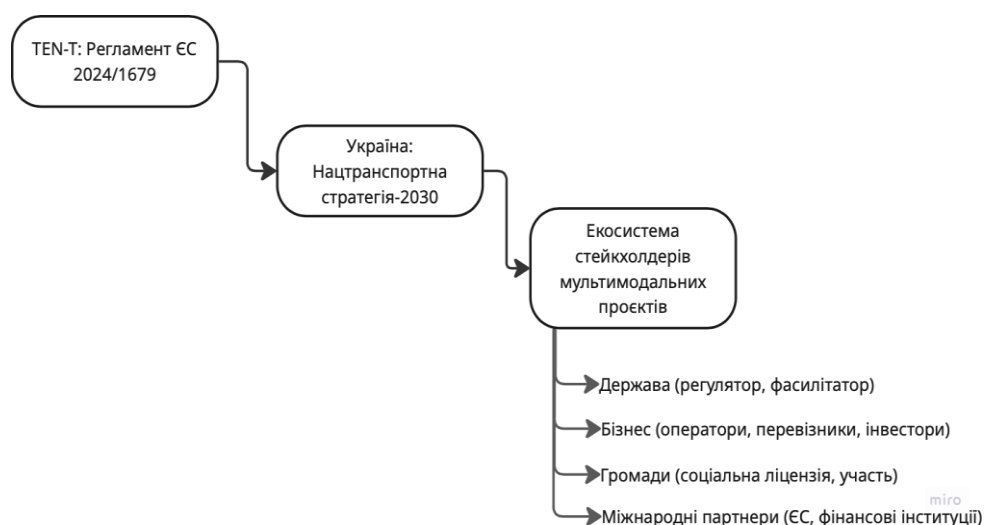


Рисунок 1 – Стрілкова діаграма взаємозв'язків «TEN-T → Україна → екосистема»

Figure 1 – Arrow diagram of interrelationships «TEN-T → Ukraine → ecosystem»

Розглянемо узагальнення ключових консенсусних позицій і наукових дискусійних питань, що вимагають додаткового дослідження (табл. 2).

Таблиця 2 – Консенсусні позиції та лакуни у наукових дослідженнях мультимодальних проєктів

Table 2 – Consensus positions and gaps in scientific research on multimodal projects

Консенсусні позиції	Дискусійні питання
Управління мультимодальними проєктами має мережевий і поліцентричний характер (shared / lead / NAO; collaborative governance; polycentric governance).	Відсутні інтегровані моделі, що одночасно враховують: ролі стейкхолдерів, режими врядування, цифрові стандарти та соціальну ліцензію.
Цифрова інтероперабельність (eFTI, DTLF, PCS, ISO 44001/21502) - ключовий фактор сучасного транспортного врядування.	Нестача інструментів моніторингу довіри і прозорості між акторами (audit-trail, commitment tracking, цифрова фіксація обіцянок).
Соціальна ліцензія на діяльність (SLO) є критичною умовою для прийнятності великих інфраструктурних ініціатив.	Недостатня локалізація європейських стандартів (TEN-T, eFTI, DTLF) до українських реалій: інституційна зрілість, кадрові ресурси, цифрова інфраструктура.
TEN-T і національні стратегії (НТСУ-2030) формують взаємопов'язану рамку для інтеграції України в європейський транспортний простір.	Бракує емпіричних досліджень щодо впливу цих рамок на конкретні проєкти в Україні (пілотні кейси, оцінка ефективності впровадження).

Представлення проблематики дослідження у вигляді ієрархічної схеми (рис. 2) дозволяє наочно представити не лише основні блоки, але й зв'язки між ними. Стрілочки у схемі виконують функцію логічних маркерів: вони вказують, що проблеми породжують потреби; потреби трансформуються у концептуальні рішення; а рішення, у свою чергу, орієнтовані на досягнення конкретних соціально-економічних, організаційних та інтеграційних результатів. Таким чином, ієрархічна карта виконує роль «дорожньої карти» дослідження, яка дозволяє чітко прослідкувати послідовність переходу від проблематики до результативності.

Однак, дана схема має діагностичний характер, вона відповідає на питання «чому модель потрібна» та «яких результатів очікуємо», але не пояснює «як саме вона працює». Тому для переходу від діагностики до системного вирішення завдань постає потреба у створенні повноцінної концептуальної моделі екосистеми взаємодії стейкхолдерів мультимодальних транспортних проєктів. Ця модель вже не обмежується логічними рівнями, а описує структуру (межі системи, ключові групи учасників), механізми (принципи партнерства, канали комунікації, цифрові інструменти), процеси (життєвий цикл взаємодії) та результати (економічні, соціальні, інтеграційні ефекти).

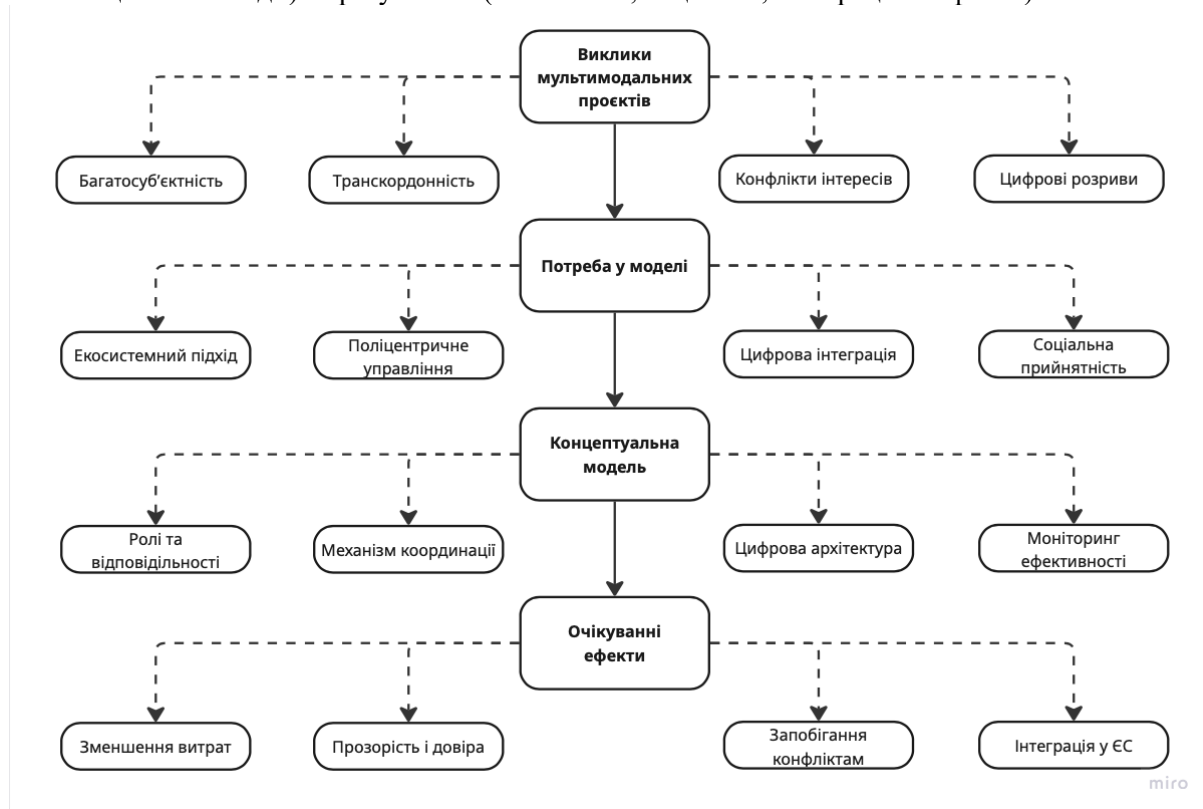


Рисунок 2 – Ієрархічна схема актуальності проблематики дослідження

Figure 2 – Hierarchical diagram of the relevance of the research topic

Перехід від дерева «проблема → потреба → рішення → ефекти» до концептуальної моделі дозволяє не лише ідентифікувати важливі чинники, а й задати практичні механізми їх інтеграції у функціонування мультимодальних транспортних систем.

Таким чином, проведений аналіз показує еволюцію поля - від фірмоцентричного менеджменту стейкхолдерів до екосистемних, мережових і цифрових рамок, притаманних мультимодальним транспортним системам. Сукупність наукових робіт з мережевого/поліцентричного врядування, мегапроєктів, мультимодальної логістики та цифрової інтероперабельності створює науково-методичну основу для Концептуальної моделі взаємодії зі стейкхолдерами. Така модель має об'єднати: (а) архітектуру ролей і відповідальностей; (б) режими мережевого врядування (і їхню гібридизацію в різних фазах/локаціях); (в) цифрові стандарти/платформи (eFTI/PCS/федеративні обміни); (г) процедури SLO; (г) метрики прозорості та довіри.

Концептуальна модель взаємодії стейкхолдерів мультимодального транспортного проєкту ґрунтується на розумінні того, що традиційні інструменти управління зацікавленими сторонами в умовах сучасних транспортних мегапроєктів втрачають ефективність. Як показує аналіз наукових досліджень та практики реалізації масштабних інфраструктурних ініціатив, класичні підходи, орієнтовані на окрему організацію чи стабільне середовище, не враховують складної багаторівневої

природи мультимодальних систем. Тому запропонована модель інтерпретує мультимодальний проєкт як екосистему, де взаємодія відбувається між численними групами стейкхолдерів, об'єднаними формальними й неформальними механізмами координації.

Екосистема взаємодії стейкхолдерів мультимодального транспортного проєкту охоплює всі організації, групи та індивіди, що прямо або опосередковано залучені до процесів планування, реалізації та експлуатації транспортної інфраструктури, а також тих, хто зазнає впливу від її функціонування [23]. Межі системи не обмежуються вузьким колом учасників проєкту, а розширюються до рівня соціально-економічного та інституційного середовища, у якому відбувається діяльність.

З огляду на життєвий цикл проєкту, екосистема охоплює етапи від ініціювання (формування концепції та стратегічних орієнтирів), через планування й будівництво (розподіл ролей, укладання контрактів, залучення фінансування), до фази експлуатації (забезпечення операційної ефективності, моніторинг результатів, адаптація до нових вимог). У цьому сенсі межі системи є динамічними: на різних фазах життєвого циклу до неї можуть приєднуватися нові учасники (наприклад, фінансові інституції чи консультанти на етапі підготовки, або ж громадські організації в процесі оцінки впливів).

Таким чином, межі екосистеми визначаються не лише формальними параметрами проєкту, а й ширшим контекстом взаємодії стейкхолдерів з транспортними компаніями, що впливають на його результативність і соціальну легітимність.

Екосистема взаємодії стейкхолдерів мультимодального транспортного проєкту розглядається як відкрита соціально-економічна система, межі якої визначаються не лише формальними параметрами конкретної інфраструктурної ініціативи, а й ширшим інституційним та суспільним середовищем. Вона охоплює всі організації, групи та індивідів, які прямо чи опосередковано впливають на проєкт або відчувають на собі наслідки його реалізації - від етапу ініціювання та залучення фінансування до завершення експлуатації об'єктів і моніторингу їхньої ефективності. Межі цієї системи є динамічними: на різних фазах життєвого циклу до неї приєднуються нові учасники, змінюється інтенсивність зв'язків і формується нова конфігурація інтересів. Саме така багатовимірність і багаторівневність робить необхідним використання концепції екосистеми, а не класичної моделі «замкненого» управління проєктом.

У центрі екосистеми перебувають ключові групи учасників, кожна з яких виконує специфічні функції та несе відповідальність за окремі аспекти розвитку. З огляду на специфіку мультимодальних перевезень, у моделі виокремлюється ключові групи стейкхолдерів:

- Держава: виступає не лише у ролі регулятора, а й фасилітатора змін. Наприклад, Міністерство розвитку громад та територій України забезпечує узгодженість внутрішніх стратегій із рамками TEN-T, а також створює правові умови для впровадження цифрових стандартів eFTI.

- Бізнес (оператори, перевізники, інвестори): відповідає за щоденне функціонування та інноваційний розвиток транспортної системи. Як свідчить практика портів Західної Європи, саме бізнес ініціює створення цифрових платформ для відстеження вантажопотоків.

- Громади: формують соціальний контекст проєкту. Досвід будівництва швидкісних магістралей показує, що відсутність соціальної ліцензії може призвести до протестів і затримок, тоді як активна участь громад створює передумови для стійкості рішень.

- Міжнародні партнери (ЄС, фінансові інституції, донори): виступають як джерело фінансування та контролю відповідності. Наприклад, фінансування Світового банку часто прив'язане до впровадження практик прозорості та сталого розвитку.

Поряд із цими ключовими групами важливе місце в екосистемі займають також операційні учасники (транспортні оператори різних видів, експедитори, логістичні компанії), що забезпечують щоденне функціонування ланцюгів постачання; інфраструктурні власники та оператори (порти, термінали, склади, аеропорти), які відповідають за підтримку та розвиток матеріальної бази; регуляторні органи (митниця, прикордонна служба, місцева влада), що здійснюють контроль та нагляд; інвестори та фінансові установи, які формують економічні умови реалізації; кінцеві користувачі як формуваці попиту й стандартів якості; громадські організації та профспілки, що впливають на

соціальну та екологічну прийнятність; а також науково-освітні установи та консультанти, які забезпечують аналітичний і методологічний супровід.

Таким чином, структурна рамка екосистеми ґрунтується на поліцентричному баченні, де жодна група стейкхолдерів не може досягти цілей самостійно. Її успішність визначається балансом між державним регулюванням і ринковими механізмами, між інноваційним розвитком бізнесу та соціальною легітимністю з боку громад, а також між локальними потребами й міжнародними зобов'язаннями. Це дозволяє забезпечити ефективність, прозорість і стійкість мультимодальних транспортних проєктів у національному та європейському контексті.

Ефективність функціонування екосистеми взаємодії стейкхолдерів мультимодальних транспортних проєктів значною мірою визначається якістю застосовуваних механізмів партнерства та комунікації. Як показує аналіз наукових джерел і практики великих інфраструктурних ініціатив, саме наявність прозорих принципів співпраці та різноманітних каналів обміну інформацією створює умови для узгодженості рішень, зниження конфліктності та підвищення стійкості проєктів.

Основними принципами партнерських відносин між транспортними підприємствами та ключовими стейкхолдерами, які забезпечують стабільність і довіру в системі є:

1. Прозорість передбачає відкритий доступ усіх учасників до ключової інформації про цілі, фінансування, строки та результати реалізації проєкту. Це дозволяє мінімізувати ризики інформаційної асиметрії, яка часто стає джерелом недовіри та управлінських конфліктів.

2. Взаємовигідність означає пошук балансу інтересів між учасниками, де кожна сторона отримує відчутну користь від участі в проєкті. Такий підхід зміщує акцент з конкуренції на співпрацю та забезпечує довгострокову стійкість партнерств.

3. Відповідальність виражається у чіткому розподілі ролей, функцій та обов'язків, що дозволяє уникнути дублювання діяльності, знизити транзакційні витрати та забезпечити ефективний контроль за виконанням завдань.

4. Інклюзивність акцентує увагу на необхідності залучення «слабких» стейкхолдерів (наприклад, місцевих громад чи малих підприємств) на ранніх етапах проєкту. Це підвищує рівень соціальної легітимності та знижує ризики протестів чи блокування ініціатив.

Поряд із принципами партнерства важливе місце у структурі механізмів взаємодії зі стейкхолдерами проєктів транспортних підприємств, займають інституційно закріплені канали комунікації, що забезпечують багаторівневий і багатоформатний обмін інформацією, а саме:

- платформи спільної роботи (онлайн-портали, системи управління проєктами) створюють технічну основу для щоденної координації дій між стейкхолдерами, що надає доступ до єдиної інформаційної бази, календарів і документів;

- регулярні форуми та робочі групи дозволяють здійснювати обговорення стратегічних питань, координувати міжвідомчі рішення та формувати довіру через безпосередні контакти між учасниками;

- публічні слухання та консультації виступають механізмом інтеграції соціальної складової, яка забезпечує включення інтересів місцевих громад і громадських організацій до процесу ухвалення рішень;

- дво- та багатосторонні переговори дають можливість оперативно врегульовувати суперечності, досягати компромісів і знижувати ймовірність ескалації конфліктів.

Таким чином, механізми взаємодії в концептуальній моделі взаємодії стейкхолдерів мультимодальних транспортних проєктів, формуються на основі принципів прозорості, взаємовигідності, відповідальності та інклюзивності, а також реалізуються через багаторівневу систему каналів комунікації. Їх застосування забезпечує узгодженість дій різних груп стейкхолдерів, мінімізацію ризиків і досягнення балансу інтересів у складному поліцентричному середовищі.

З огляду на багаторівневий та поліцентричний характер екосистеми мультимодальних транспортних проєктів, ефективність управління значною мірою залежить від узгодженого поєднання принципів партнерства та інституційно закріплених каналів комунікації. Принципи створюють ціннісну й нормативну основу взаємодії, тоді як канали забезпечують практичну реалізацію цих принципів у процесі щоденного функціонування екосистеми взаємодії стейкхолдерів мультимодальних транспортних проєктів (табл. 3).

Таблиця 3 – Механізми взаємодії стейкхолдерів в екосистемі мультимодальних транспортних проєктів

Table 3 – Mechanisms of stakeholder interaction in the ecosystem of multimodal transport projects

Принцип партнерства	Відповідні канали комунікації	Очікуваний ефект
Прозорість	Платформи спільної роботи (онлайн-портали, системи управління проєктами); публічні слухання	Відкритий доступ до даних, мінімізація інформаційної асиметрії, підвищення довіри та підзвітності.
Взаємовигідність	Регулярні форуми та робочі групи; дво- та багатосторонні переговори	Баланс інтересів сторін, зсув від конкуренції до співпраці, довгострокова стійкість партнерства.
Відповідальність	Системи управління проєктами з фіксацією ролей; робочі групи	Чіткий розподіл завдань, уникнення дублювання функцій, посилений моніторинг виконання.
Інклюзивність	Публічні консультації; участь громад у робочих групах	Залучення «слабких» стейкхолдерів, соціальна легітимність рішень, зниження ризиків конфліктів і протестів.

Особливе значення в моделі мають ієрархічні типи взаємодії. Вертикальні зв'язки простежуються від наднаціональних інституцій до національної політики і далі - до бізнесу та громад, що відображає логіку імплементації регламентів TEN-T в український контекст та забезпечує узгодженість стратегічних пріоритетів. Горизонтальні відносини виникають між операторами різних видів транспорту або між органами влади різних рівнів, створюючи необхідні передумови для балансування інтересів. Цифрова взаємодія реалізується через стандарти eFTI, DTLF та PCS, які дозволяють забезпечити прозорість даних, уніфікованість форматів та простежуваність рішень. Водночас соціальна взаємодія формує основу довіри та легітимності, адже від рівня участі громад у процесах планування й експлуатації залежить загальна прийнятність проєктів.

Важливим елементом концептуальної моделі є механізми координації, які поєднують формальні, неформальні та інноваційні складові. Формальні механізми представлені нормативними документами (TEN-T, ISO 44001, ISO 21502), інструментами розподілу ролей (RACI-матриці) та системами оцінки результативності (KPI). Неформальні механізми ґрунтуються на довірі, партнерстві та практиках «малих перемог», які поступово зміцнюють взаєморозуміння між учасниками проєкту. Інноваційні механізми пов'язані з використанням цифрових платформ, що дозволяють відслідковувати всі транзакції та зобов'язання (audit trail, commitment tracking), підвищуючи прозорість і запобігаючи конфліктам. Саме поєднання цих трьох вимірів робить модель гнучкою та адаптивною.

Організація взаємодії зі стейкхолдерами в межах мультимодальних транспортних проєктів є безперервним процесом, що має форму життєвого циклу та охоплює кілька взаємопов'язаних фаз. Такий підхід відповідає логіці сучасних міжнародних стандартів управління проєктами (ISO 21502, PMBOK) і дозволяє інтегрувати стратегічні та операційні аспекти управління взаємовідносинами з учасниками проєкту, забезпечуючи їхню сталість і гнучкість.

Першою фазою є ідентифікація стейкхолдерів, яка передбачає створення повного реєстру всіх залучених груп та індивідів - від державних органів і операторів транспортної інфраструктури до кінцевих користувачів і громадських організацій. На цьому етапі формується карта впливу та інтересів, що дозволяє визначити силу, легітимність і терміновість вимог кожного учасника. Коректна ідентифікація є передумовою уникнення виключення важливих, але менш «видимих» сторін, що особливо актуально у складних поліцентричних системах.

Другою фазою виступає аналіз, у межах якого здійснюється оцінка рівня впливу та зацікавленості стейкхолдерів, їхнього ставлення до проєкту (прибічники, нейтральні учасники, опоненти), а також ризиків і можливостей, які вони можуть генерувати. Використання

багатокритеріального аналізу (ANP, АНР), а також методів соціально-мережевого аналізу (SNA) дає змогу визначити центральних гравців та окреслити взаємозалежності у структурі зв'язків між ними. Це створює інформаційне підґрунтя для подальшого планування стратегій їхньої взаємодії.

Наступною фазою є планування взаємодії, яке передбачає розроблення диференційованих стратегій для кожної групи стейкхолдерів. Такі стратегії визначають цілі, інструменти та інтенсивність комунікацій, беручи до уваги як інтереси зацікавлених сторін, так і ресурсні можливості проєкту. Наприклад, для стратегічних партнерів ефективним є застосування механізмів спільного управління, тоді як для місцевих громад оптимальним інструментом виступають регулярні консультації та процедури отримання соціальної ліцензії на діяльність. Планування також охоплює вибір конкретних каналів комунікації - від цифрових платформ і спеціалізованих порталів до робочих груп і публічних слухань.

Четвертою фазою є реалізація комунікацій, що втілює розроблені стратегії у практику. На цьому етапі організовуються зустрічі, переговори та робочі форуми, здійснюється обмін інформацією через цифрові системи й координація дій учасників. Важливою умовою успіху є узгодженість повідомлень, збереження довіри та своєчасне врегулювання потенційних конфліктів. Ефективна реалізація комунікацій дозволяє знизити транзакційні витрати й забезпечити оперативність прийняття управлінських рішень.

Завершальною, але водночас постійною фазою виступає моніторинг та адаптація. Вона полягає у відстеженні ефективності комунікаційних процесів і коригуванні підходів відповідно до змін зовнішнього середовища чи поведінки стейкхолдерів. Для цього застосовуються ключові показники ефективності (KPI), інструменти аудиту прозорості та механізми зворотного зв'язку з громадами та бізнесом. Адаптація може означати як зміну інтенсивності комунікацій, так і впровадження нових цифрових інструментів або форматів взаємодії.

Таким чином, життєвий цикл взаємодії стейкхолдерів у мультимодальних транспортних проєктах являє собою структурований процес, що проходить через етапи ідентифікації, аналізу, планування, реалізації та моніторингу з подальшою адаптацією. Його безперервний характер дозволяє підтримувати релевантність і ефективність управління у складному поліцентричному середовищі, а також забезпечує узгодженість дій, прозорість і баланс інтересів усіх сторін проєкту.

Логіка життєвого циклу мультимодального проєкту передбачає послідовне застосування моделі на різних етапах. На фазі ініціації ключовим є картування стейкхолдерів, визначення їхніх інтересів і впливу за допомогою таких інструментів, як матриця «влада/інтерес» або модель салентності. На етапі планування формуються структури управління, обираються відповідні режими врядування (shared governance, lead organization, NAO) та визначаються зони відповідальності. У процесі реалізації пріоритетом стає координація операцій і цифрова інтеграція, що забезпечується через eFTI, PCS та інші інструменти. На стадії експлуатації важливими є моніторинг показників ефективності та підтримка соціальної ліцензії, а на етапі адаптації - внесення змін відповідно до еволюції нормативного та соціального середовища. Таким чином, запропонована модель забезпечує безперервний цикл управління, де ключову роль відіграє здатність до оновлення.

Ефективність реалізації мультимодальних транспортних проєктів значною мірою залежить від того, наскільки системно та збалансовано побудована взаємодія між усіма групами стейкхолдерів. Як показує аналіз сучасних досліджень і практичних кейсів, відсутність чіткого механізму узгодження інтересів призводить до конфліктів, затримок у виконанні робіт, перевищення бюджетів і навіть блокування стратегічних ініціатив. Саме тому ключовим завданням, є не лише визначення кола зацікавлених сторін, а й розробка адекватних стратегій комунікації та партнерства, що враховують специфіку їхніх інтересів, типи зв'язків і потенційні ризики.

В таблиці 4 об'єднані ключові параметри моделі: групи стейкхолдерів, типи зв'язків, основні інтереси, потенційні ризики конфліктів і рекомендовані стратегії взаємодії. Така структура дозволяє систематизувати роль кожного учасника проєкту, виявити критичні точки потенційних напружень і, що найважливіше, окреслити оптимальні форми партнерства та досягти баланс між ефективністю, соціальною легітимністю та інтеграцією в європейський транспортний простір.

Таблиця 4 – Групи стейкхолдерів мультимодального проєкту з рекомендованими стратегіями взаємодії

Table 4 – Stakeholder groups of a multimodal project with recommended interaction strategies

Група стейкхолдерів	Типи зв'язків	Основні інтереси	Потенційні ризики конфлікту	Рекомендовані стратегії взаємодії
Лідер екосистеми (агенція, держава, оператор-координатор)	Всі типи (нормативні, фінансові, інформаційні, соціальні)	Координація учасників, стратегічний розвиток, стабільність системи	Недовіра з боку учасників, надмірна бюрократизація	Collaborate (співпраця), Empower (делегування частини повноважень)
Операційні учасники (залізниця, автоперевізники, судноплавні компанії, експедитори)	Інформаційні, фінансові, операційна взаємодія	Прибутковість, оптимізація маршрутів, швидкість перевезень	Конкуренція між видами транспорту, несинхронність графіків	Collaborate (партнерство), Consult (консультації при змінах правил)
Інфраструктурні оператори (порти, термінали, склади)	Інформаційні, операційна взаємодія	Завантаженість об'єктів, інвестиції в розвиток	Черги, простої, невдоволення клієнтів через затримки	Collaborate (спільне планування), Involve (залучення в обговорення)
Регуляторні органи (міністерства, митниця, прикордонна служба, місцева влада)	Нормативні, соціальні, експертиза	Контроль, дотримання законодавства, безпека	Перевантаження регуляціями, корупційні ризики, опір бізнесу	Consult (консультації з бізнесом і громадами), Involve (робочі групи)
Інвестори та фінансисти (банки, приватні інвестори)	Фінансові, аналітика ризиків	Доходність, захищеність інвестицій, прозорість використання коштів	Недостатня підзвітність, політичні ризики, дефолти партнерів	Consult (регулярна звітність), Collaborate (спільне планування фінансування)
Кінцеві користувачі (вантажовласники, клієнти логістичних послуг)	Ринкові, соціальний запит	Вигідні тарифи, швидка доставка, надійність	Незадоволення сервісом, втрати довіри, відхід до конкурентів	Inform (інформаційні кампанії), Consult (опитування, фокус-групи)
Громади та неурядові організації (НУО) (місцеве населення, екологічні організації, профспілки)	Соціальні, суспільний контроль	Мінімізація шуму, забруднення, користь для місцевої економіки	Протести проти будівництва, блокування проєктів, репутаційні втрати	Involve (громадські слухання), Collaborate (екологічні угоди), Empower (участь у моніторингу)
Наука та експерти (університети, дослідницькі центри, консультанти)	Аналітичні, експертиза, аналітика ризиків	Розробка методик, впровадження інновацій, освітні й наукові проєкти	Ігнорування рекомендацій, недостатнє фінансування наукової підтримки	Collaborate (спільні дослідження), Consult (експертизи), Inform (публікації результатів)

Очікувані результати від застосування моделі мають комплексний характер. Зменшення транзакційних витрат досягається завдяки цифровій інтегрованості, яка мінімізує дублювання процесів і скорочує час обміну інформацією. Підвищення прозорості та підзвітності стає можливим

завдяки впровадженню цифрових стандартів і механізмів аудиту. Зростання довіри між стейкхолдерами забезпечується інтеграцією соціальної складової та врахуванням інтересів громад. Таким чином, модель створює підґрунтя для прискорення інтеграції України до європейського транспортного простору TEN-T, адже вона орієнтована на відповідність європейським вимогам і стандартам управління.

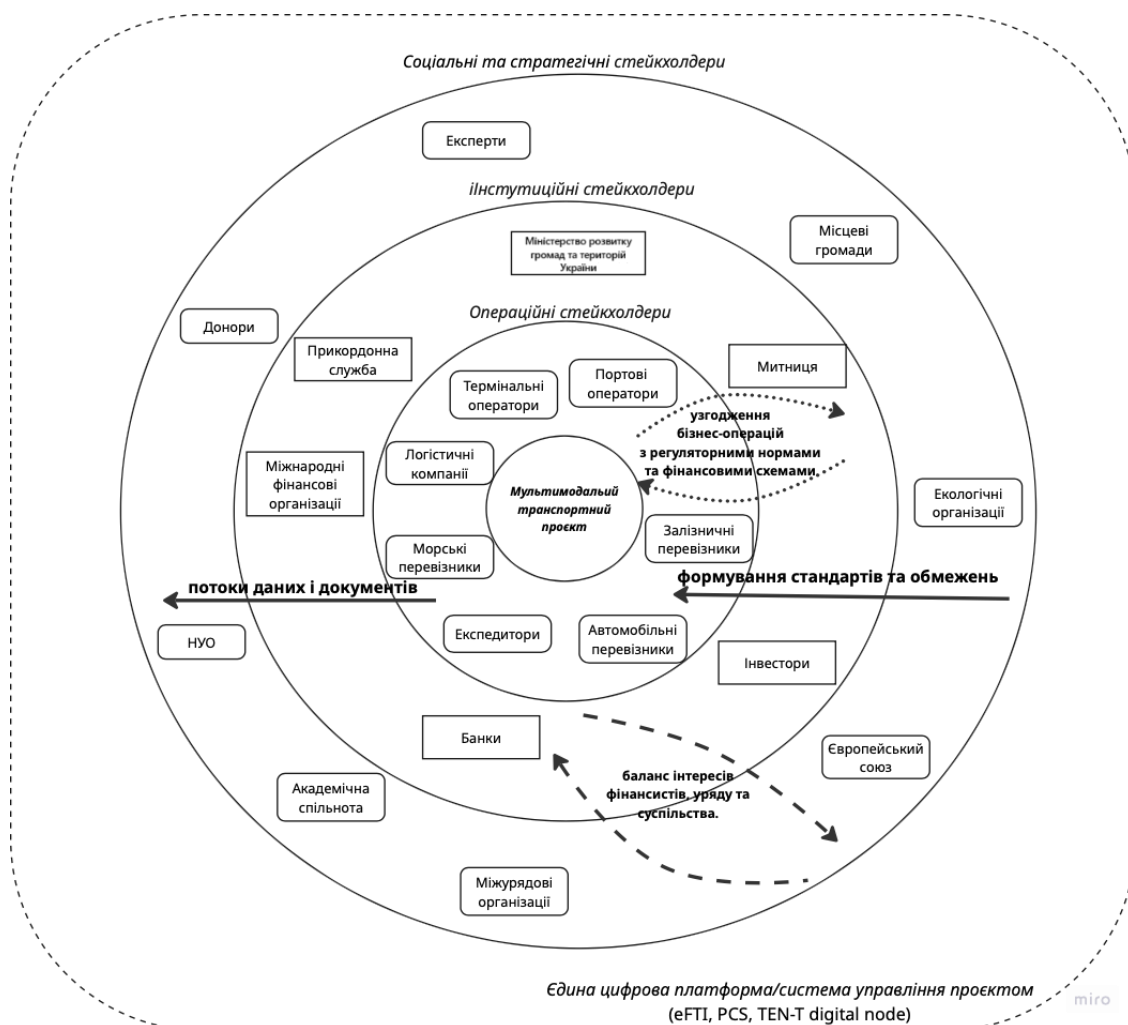


Рисунок 3 – Концептуальна модель взаємодії стейкхолдерів мультимодальних транспортних проєктів
Figure 3 – Conceptual model of stakeholder interaction in multimodal transport projects

На основі виявлених викликів і сформованих потреб побудовано концептуальну модель взаємодії стейкхолдерів мультимодальних транспортних проєктів (рис. 3).

Запропонована модель інтегрує структурну архітектуру екосистеми, механізми комунікації та цифрові інструменти, що забезпечують узгодженість дій різних груп стейкхолдерів. Модель відображає як вертикальні відносини (регуляторні, фінансові, нормативні), так і горизонтальні зв'язки (партнерські, інформаційні, соціальні), створюючи багаторівневу систему управління. Її практична цінність полягає в поєднанні теоретичних підходів (stakeholder salience, network governance, поліцентричне врядування) з актуальними викликами інтеграції України до європейського транспортного простору (TEN-T, eFTI, цифровізація логістики).

З огляду на наведене, концептуальна модель екосистеми взаємодії стейкхолдерів мультимодальних транспортних проєктів може розглядатися як методологічна основа для подолання наявних лакун у наукових дослідженнях та практиці. Вона інтегрує різні підходи - від класичних теорій стейкхолдер-менеджменту до сучасних принципів цифрового врядування та соціальної прийнятності. У результаті формується багатовимірна структура, здатна забезпечити ефективність, стійкість і легітимність транспортних проєктів у контексті європейської інтеграції України.

Висновки. Управління взаємодією зі стейкхолдерами проєктів транспортних підприємств, особливо тих, що характеризуються масштабністю та багаторівневістю, має поліцентричний і екосистемний характер. Традиційні інструменти, зосереджені на окремих організаціях або лінійних ієрархіях, не забезпечують належного рівня узгодженості інтересів у середовищі, яке визначається високою складністю, різномірністю учасників та динамікою нормативних і соціально-економічних змін. Запропонована концептуальна модель демонструє можливість інтеграції інституційних, організаційних, соціальних і цифрових вимірів управління. Це створює підґрунтя для підвищення ефективності, прозорості, стійкості та соціальної легітимності транспортних ініціатив. Застосування запропонованої моделі дозволяє мінімізувати транзакційні витрати, зменшити ризики конфліктів, забезпечити прозорість комунікацій і підвищити рівень довіри між державою, бізнесом, інвесторами та громадами.

Разом із тим отримані результати мають передусім концептуально-методологічний характер і вимагають подальшого розвитку у напрямі формалізації та кількісної оцінки взаємодій між стейкхолдерами. Перспективним завданням є побудова математичної моделі екосистеми транспортного проєкту, яка дозволить перейти від якісних описів до кількісного вимірювання ролей, впливів і ризиків. Для цього можуть застосовуватися багатокритеріальний аналіз для визначення вагових коефіцієнтів стейкхолдерів, методи теорії ігор і коаліцій для прогнозування стратегій взаємодії й розподілу вигод, а також соціальний мережевий аналіз для оцінки центральності й посередництва у структурі зв'язків. Важливим напрямом подальших досліджень є моделювання життєвого циклу транспортного проєкту, з урахуванням динамічної зміни ролей і стратегій стейкхолдерів на різних фазах - від ініціації до експлуатації й адаптації. Це дасть змогу розробляти сценарії розвитку, своєчасно ідентифікувати ризики та пропонувати альтернативні управлінські рішення для їхньої мінімізації.

Не менш актуальним є завдання інтеграції цифрових даних у математичні моделі, що відкриває можливості для створення систем підтримки прийняття рішень (DSS). Використання реальних операційних даних (track&trace, електронні транспортні документи, фінансові показники, KPI) забезпечить симуляційне прогнозування наслідків управлінських рішень і дозволить оптимізувати координацію у реальному часі. Особливої уваги потребує розроблення метрик прозорості й довіри, які можна формалізувати у вигляді показників ефективності взаємодії та перевіряти через цифрові інструменти на кшталт audit trail чи commitment tracking. Верифікація моделей має відбуватися на основі практичних кейсів транспортних проєктів різного масштабу - від локальних інфраструктурних ініціатив до міжнародних коридорів, що дозволить перевірити прогностичні можливості та визначити оптимальні механізми узгодження інтересів у мінливому середовищі.

Таким чином, метою подальших досліджень є зосередження на інтеграції концептуальної та математичної складових, що перетворить запропоновану модель з аналітичної рамки на практичний інструментарій управління. Це дозволить створити інтелектуальні системи моделювання й оптимізації, які здатні забезпечити баланс між економічною ефективністю, соціальною прийнятністю та інституційною відповідністю у транспортних проєктах будь-якого масштабу. У перспективі така інтеграція може стати ключовим чинником стійкої реалізації та розвитку транспортних систем у контексті глобальних викликів і європейської інтеграції.

Перелік посилань

1. Freeman R. E. *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Boston : Pitman, 1984. 276 p.
2. Kramarz M., Kramarz W., Kramarz M. Stakeholders of the multimodal freight transport ecosystem in cross-border area. *Energies*. 2021. Vol. 14. Issue 3. P. 678. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14030678>.

3. Erkul M., Yitmen I., Arditi D. Stakeholder Engagement in Mega Transport Infrastructure Projects. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. P. 704–710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.731>.
4. Regulation (EU) 2020/1056 of the European Parliament and of the Council of 15 July 2020 on electronic freight transport information. *Official Journal of the European Union*. 2020. L 249. P. 33–48.
5. Міністерство інфраструктури України. *Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року*. Київ : МІУ, 2018. 58 с. URL: <https://mtu.gov.ua> (дата звернення: 20.08.2025).
6. Mitchell R. K., Agle B. R., Wood D. J. Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience. *Academy of Management Review*. 1997. Vol. 22. No. 4. P. 853–886. DOI: 10.5465/amr.1997.9711022105.
7. Aaltonen K., Kujala J. A project lifecycle perspective on stakeholder influence strategies in global projects. *International Journal of Project Management*. 2010. Vol. 28. Issue 7. P. 809–819. DOI: 10.1016/j.ijproman.2010.05.002.
8. Reed M. S., Graves A., Dandy N., et al. Who's in and why? A typology of stakeholder analysis methods. *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90. Issue 5. P. 1933–1949. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.01.001.
9. Olander S. Stakeholder impact analysis in construction project management. *Construction Management and Economics*. 2007. Vol. 25. No. 3. P. 277–287. DOI: 10.1080/01446190600879125.
10. Flyvbjerg B. What You Should Know About Megaprojects and Why: An Overview. *Project Management Journal*. 2014. Vol. 45. No. 2. P. 6–19. DOI: 10.1002/pmj.21409.
11. Provan K. G., Kenis P. Modes of Network Governance: Structure, Management, and Effectiveness. *Journal of Public Administration Research and Theory*. 2008. Vol. 18. No. 2. P. 229–252. DOI: 10.1093/jopart/mum015.
12. Ansell C., Gash A. Collaborative Governance in Theory and Practice. *Journal of Public Administration Research and Theory*. 2008. Vol. 18. No. 4. P. 543–571. DOI: 10.1093/jopart/mum032.
13. Ostrom E. Polycentric Governance of Complex Economic Systems. *American Economic Review*. 2010. Vol. 100. No. 3. P. 641–672. DOI: 10.1257/aer.100.3.641.
14. Rodrigue J-P. *The Geography of Transport Systems*. 5th ed. London : Routledge, 2020. 456 p.
15. United Nations Economic Commission for Europe. Terminology on Combined Transport. Geneva : UNECE, 2019. 56 p.
16. ISO 17185:2014. Intelligent transport systems — Public transport user information. Geneva : International Organization for Standardization, 2014.
17. FEDeRATED. Federated platforms for data sharing in logistics. Brussels, 2024. URL: <https://federatedplatforms.eu> (дата звернення: 21.08.2025).
18. European Commission. *Digital Transport and Logistics Forum (DTLF)*. Brussels : EC, 2021. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/digital-transport-and-logistics-forum-dtlf_en (дата звернення: 21.08.2025).
19. ISO 44001:2017. *Collaborative business relationship management systems – Requirements and framework*. Geneva : ISO, 2017.
20. IMO. *FAL.5/Circ.54 Guidelines on Port Community Systems*. London : IMO, 2024.
21. Moffat K., Zhang A. The paths to social licence to operate: An integrative model explaining community acceptance of mining. *Resources Policy*. 2014. Vol. 39. P. 61–70. DOI: 10.1016/j.resourpol.2013.11.003.
22. Regulation (EU) 2024/1679 of 13 June 2024 on Union guidelines for the development of the trans-European transport network (TEN-T). *Official Journal of the European Union*. 2024. L 171.
23. Кравчук І.В., Литвишко Л.О. Сучасні підходи до управління стейкхолдерами проєктів транспортних підприємств. *Науковий журнал «Управління розвитком складних систем»*. Вип. 60. КНУБА: Київ, 2024. С. 79–86. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.79-86> URL: <https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-60/79-86.pdf>

CONCEPTUAL MODEL OF STAKEHOLDER ENGAGEMENT IN A MULTIMODAL TRANSPORT ENTERPRISE PROJECTS

Lytvyshko Liliia O., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: l.lytvyshko@ntu.edu.ua, tel.+380442808438, <https://orcid.org/0000-0001-9315-046X>

Kravchuk Ivan V., PhD student in the Department of Management, specialty 073 «Management», National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kravchukivan22@ukr.net, тел.+380442808438, <https://orcid.org/0009-0007-2540-4625>

Summary. In today's environment, transport project management requires new approaches to stakeholder engagement, as traditional tools do not provide adequate coordination in complex, dynamic, and politically risky conditions.

The lack of integrated models of interaction, insufficient localization of European standards in Ukrainian realities, and the lack of quantitative methods for assessing trust and transparency complicate the effective management of transport initiatives. Therefore, it is necessary to develop a conceptual model for interacting with stakeholders in transport projects based on ecosystem and polycentric approaches, which will combine formal, informal, and digital coordination mechanisms.

Based on the research, a conceptual model of the ecosystem was developed, integrating institutional, organizational, social, and digital dimensions of governance. The basic principles (transparency, mutual benefit, responsibility, inclusiveness) have been defined, communication channels (digital platforms, consultations, working groups) and coordination mechanisms (regulations, trust, innovative digital tools) have been outlined. The proposed model shows how the combination of government, business, social, and international partners reduces transaction costs and increases the sustainability of transport enterprise projects. The developed model forms the basis for the practical implementation of a system for managing interaction with stakeholders in transport projects. Further research will focus on formalizing interactions by developing mathematical models using multi-criteria analysis, social network analysis, and simulation DSS systems, which will allow a transition from qualitative descriptions to quantitative assessment of impacts and risks.

Keywords: multimodal transport project, project management, stakeholders, conceptual model, ecosystem, network governance, polycentric governance, digital integration, interoperability, interaction management, sustainable development, management decision-making, strategic guidelines.

References

1. Freeman R. E. *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Boston : Pitman, 1984. 276 p.
2. Kramarz M., Kramarz W., Kramarz M. Stakeholders of the multimodal freight transport ecosystem in cross-border area. *Energies*. 2021. Vol. 14. Issue 3. P. 678. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14030678>.
3. Erkul M., Yitmen I., Arditi D. Stakeholder Engagement in Mega Transport Infrastructure Projects. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. P. 704–710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.731>.
4. Regulation (EU) 2020/1056 of the European Parliament and of the Council of 15 July 2020 on electronic freight transport information. *Official Journal of the European Union*. 2020. L 249. P. 33–48.
5. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku. Kyiv : MIU, 2018. 58 s. URL: <https://mtu.gov.ua>
6. Mitchell R. K., Agle B. R., Wood D. J. Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience. *Academy of Management Review*. 1997. Vol. 22. No. 4. P. 853–886. DOI: 10.5465/amr.1997.9711022105.
7. Aaltonen K., Kujala J. A project lifecycle perspective on stakeholder influence strategies in global projects. *International Journal of Project Management*. 2010. Vol. 28. Issue 7. P. 809–819. DOI: 10.1016/j.ijproman.2010.05.002.
8. Reed M. S., Graves A., Dandy N., et al. Who's in and why? A typology of stakeholder analysis methods. *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90. Issue 5. P. 1933–1949. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.01.001.

9. Olander S. Stakeholder impact analysis in construction project management. *Construction Management and Economics*. 2007. Vol. 25. No. 3. P. 277–287. DOI: 10.1080/01446190600879125.
10. Flyvbjerg B. What You Should Know About Megaprojects and Why: An Overview. *Project Management Journal*. 2014. Vol. 45. No. 2. P. 6–19. DOI: 10.1002/pmj.21409.
11. Provan K. G., Kenis P. Modes of Network Governance: Structure, Management, and Effectiveness. *Journal of Public Administration Research and Theory*. 2008. Vol. 18. No. 2. P. 229–252. DOI: 10.1093/jopart/mum015.
12. Ansell C., Gash A. Collaborative Governance in Theory and Practice. *Journal of Public Administration Research and Theory*. 2008. Vol. 18. No. 4. P. 543–571. DOI: 10.1093/jopart/mum032.
13. Ostrom E. Polycentric Governance of Complex Economic Systems. *American Economic Review*. 2010. Vol. 100. No. 3. P. 641–672. DOI: 10.1257/aer.100.3.641.
14. Rodrigue J-P. *The Geography of Transport Systems*. 5th ed. London : Routledge, 2020. 456 p.
15. United Nations Economic Commission for Europe. Terminology on Combined Transport. Geneva : UNECE, 2019. 56 p.
16. ISO 17185:2014. Intelligent transport systems — Public transport user information. Geneva : International Organization for Standardization, 2014.
17. FEDeRATED. Federated platforms for data sharing in logistics. Brussels, 2024. URL: <https://federatedplatforms.eu> (дата звернення: 21.08.2025).
18. European Commission. *Digital Transport and Logistics Forum (DTLF)*. Brussels : EC, 2021. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/digital-transport-and-logistics-forum-dtlf_en (дата звернення: 21.08.2025).
19. ISO 44001:2017. *Collaborative business relationship management systems – Requirements and framework*. Geneva : ISO, 2017.
20. IMO. *FAL.5/Circ.54 Guidelines on Port Community Systems*. London : IMO, 2024.
21. Moffat K., Zhang A. The paths to social licence to operate: An integrative model explaining community acceptance of mining. *Resources Policy*. 2014. Vol. 39. P. 61–70. DOI: 10.1016/j.resourpol.2013.11.003.
22. Regulation (EU) 2024/1679 of 13 June 2024 on Union guidelines for the development of the trans-European transport network (TEN-T). *Official Journal of the European Union*. 2024. L 171.
23. Kravchuk I.V., Lytvynshko L.O. Suchasni pidkhody do upravlinnia steikkholderamy proiektiv transportnykh pidpriemstv. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. Kyiv, 2024. No. 60. S. 79–86. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.79-86> URL: <https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-60/79-86.pdf>

Дата надходження до редакції 21.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 19.02.2026.

УДК 658.012.2
UDC 658.012.2

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-412-419

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ
ТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**ENSURING COMPETITIVENESS AND ECONOMIC SECURITY OF TRANSPORT
ENTERPRISES THROUGH THE IMPLEMENTATION OF MODERN INFORMATION
TECHNOLOGIES**



Малахова Юлія Анатоліївна, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: yu.malakhova@ntu.edu.ua, тел. +380442808438

<https://orcid.org/0000-0002-8769-7597>



Самойленко Євген Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри менеджменту, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: ie.samoilenko@ntu.edu.ua, тел. +38098808800

<https://orcid.org/0000-0001-8352-2282>



Гребельник Микола Миколайович, старший викладач кафедри менеджменту, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: m.hrebelynyk@ntu.edu.ua, тел. +380442808438

<https://orcid.org/0000-0001-8385-8261>

Анотація: На сьогоднішній день в умовах масштабної цифровізації більшості напрямків економічної діяльності, використання сучасних інформаційних технологій стає основним чинником забезпечення конкурентоспроможності та економічної безпеки підприємств. У статті досліджено сучасний стан впровадження основних інформаційно-комунікативних інструментів та технологій підприємствами України. Наведено частку підприємств, що застосовують у своїй діяльності ERP-системи, хмарні обчислення, соціальні медіа, технології “великих даних” та штучного інтелекту. Зазначено основні напрямки використання новітніх інформаційних технологій транспортними підприємствами та обґрунтовано їх вплив на забезпечення конкурентоспроможності та економічної безпеки. Проаналізовано можливі ризики, пов’язані зі збором та захистом даних, а також перспективи розвитку подальшого впровадження інформаційно-комунікативних технологій та інструментів.

Ключові слова: інформаційні технології, конкурентоспроможність підприємств, економічна безпека, транспортна галузь, транспортне підприємство, цифрові інструменти, інформаційна безпека.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. В сучасних умовах постіндустріального розвитку інформаційні системи та технології виступають ключовим інструментом, що забезпечує функціонування та розвиток усіх сфер суспільного життя, а також більшості напрямів економічної діяльності. На сьогоднішній день ефективність діяльності підприємств, економічна безпека та збільшення їх конкурентних переваг стає неможливим без активного впровадження новітніх інформаційних технологій. За останні роки інформаційні технології все більш активніше інтегруються в діяльність організацій та бізнесових структур, забезпечуючи створення нових товарів і послуг, стратегій розвитку, комплексних систем автоматизованого проектування та планування виробничих процесів, а також засобів програмного супроводу фінансового, податкового, управлінського обліку з метою досягнення конкурентних переваг та утримання ринкових позицій [1, 2].

Сучасні тенденції розвитку транспортної галузі характеризуються масштабною цифровою трансформацією, яка виступає визначальним фактором забезпечення конкурентоспроможності підприємств на світовому ринку. В умовах глобалізації ринку та зростаючого обсягу вантажних перевезень, транспортні підприємства стикаються з необхідністю оптимізації виробничих процесів, підвищення ефективності управління ресурсами, забезпечення економічної, інформаційної безпеки тощо. Сучасні інформаційні технології забезпечують досягнення цих цілей, шляхом збору, обробки та аналізу великих обсягів даних у режимі реального часу. Для вантажно-логістичних компаній впровадження інформаційних технологій стає стратегічною необхідністю, адже від своєчасного й безпечного транспортування вантажів залежить їхня ринкова позиція та довіра клієнтів [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження вказують, що інформаційні технології мають значний потенціал у підвищенні результативності та ефективності управління транспортними підприємствами. Зокрема, концепції цифрової трансформації передбачають інтеграцію сучасних інформаційних технологій на усіх рівнях організаційних процесів, а саме планування маршрутів: алгоритми в реальному часі аналізують дорожній трафік, погодні умови, проведення ремонтних робіт та інші показники для побудови найшвидшого і найбільш дешевого маршруту, що дозволяє економити паливо та зменшувати знос транспорту; планування складських запасів: аналітика допомагає визначити оптимальний рівень запасів, уникаючи як їхнього надлишку, так і нестачі; прогнозне технічне обслуговування: датчики на транспорті збирають дані про стан двигунів, гальм, інших систем та, аналізуючи цю інформацію, можна вчасно планувати обслуговування, уникаючи небажаних поломок і простоїв; контроль фінансових показників; взаємодія з клієнтами тощо [5, 6].

В рамках сучасних досліджень, використання аналітики великих даних (Big Data), а також застосування штучного інтелекту та нейронних мереж дозволяє компаніям аналізувати маршрути, прогнозувати завантаженість доріг, терміни доставки, витрати пального, ризики аварійних ситуацій. Такий комплексний підхід надає змогу не лише реагувати на поточні події, а й активно передбачати потреби клієнтів та ринкові тренди. Застосування технології IoT (Internet of Things) забезпечує моніторинг транспортних засобів у реальному часі, контроль стану вантажу та аналіз поведінки водія, що дає змогу підвищити безпеку перевезень [7, 8].

Матеріали та методи. Методологічною основою дослідження виступають такі традиційні загальнонаукові та спеціальні методи: статистичний – для аналізу та виявлення закономірностей показників діяльності підприємств; системний – для комплексного вивчення розвитку транспортної галузі як цілісної технічної, соціо-економічної системи та визначення взаємозв'язків між її елементами; індукції та дедукції – формування теоретичних узагальнень на основі вивчення емпіричних даних; систематизації та класифікації – впорядкування основних інформаційних технологій, інструментів, інновацій у транспортному секторі.

Метою роботи є аналіз та перспективи розвитку використання сучасних інформаційних технологій, а також їх вплив на забезпечення конкурентоспроможності та економічної безпеки транспортних підприємств.

Виклад основного матеріалу. Інформаційну технологію можна визначити як сукупність процедур, спрямованих на виконання функцій збору, накопичення, зберігання, обробки, аналізу та передавання даних, що здійснюються із використанням відповідного комплексу технічних засобів і за

участі управлінського персоналу. В останні роки активне впровадження інформаційних технологій триває у всіх галузях світової економіки. Однак, якщо раніше цей процес розвивався переважно стихійно та без системної координації, то нині провідні компанії усвідомили потребу в упорядкованому та стратегічно виважені підході. За даними Державної служби статистики України станом на 2025 рік частка підприємств із принаймні базовим рівнем цифрової інтенсивності у загальній кількості підприємств становить 22,8 відсотків.

Сучасні інформаційно-комунікаційні технології охоплюють значний спектр інструментів та розробок, серед яких інтернет речей, штучний інтелект, великі дані, машинне навчання, блокчейн, системи моніторингу, робототехніка, віртуальна реальність, хмарні обчислення та інші інноваційні рішення. На рисунку 1 відображено динаміку використання інформаційних технологій (ERP-систем, хмарних обчислень, соціальних медіа) українськими підприємствами за останні роки.

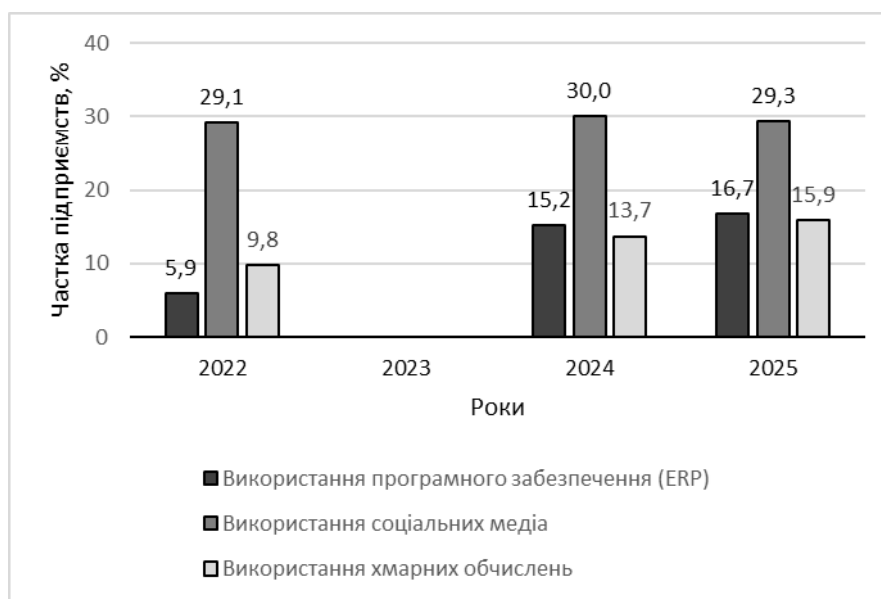


Рисунок 1 – Динаміка використання інформаційних технологій підприємствами України
Figure 1 – Dynamics of the use of information technologies by Ukrainian enterprises

Джерело: сформовано автором за [9]

Аналіз статистичних даних вказує на те, що частка підприємств, що використовує соціальні медіа протягом останніх років майже не змінювалось, в середньому становить 30%. Проте зросла частка підприємств, які купували послуги хмарних обчислень з 9,8% у 2022 році до 15,9% у 2025 році та майже в три рази зросла частка підприємств, що використовує програмне забезпечення (ERP) – з 5,9% до 16,7%. ERP-системи інтегрують основні бізнес-процеси підприємства, включаючи фінанси, управління персоналом, логістику, виробничі процеси, що забезпечує можливість централізованого управління та підвищення прозорості операцій [9].

Рисунок 2 демонструє динаміку використання технологій “великих даних” та штучного інтелекту українськими підприємствами. Згідно статистичних даних найбільша частка підприємств що використовувала технології “великих даних” була в 2024 році та становила 21,4%. Частка підприємств, які використовують інструменти штучного інтелекту протягом останніх років майже не змінювалась – близько 5%.

Сучасні транспортні підприємства, вантажно-логістичні компанії використовують широкий спектр інформаційних технологій для підвищення ефективності управління, зниження витрат, своєчасної доставки вантажів та забезпечення економічної безпеки. Серед основних інструментів застосування інформаційних технологій можна виділити: технології “великих даних” (Big Data), штучний інтелект та машинне навчання, інтернет речей (IoT), електронна комерція, цифрові логістичні ланцюги, цифрові маркетингові інструменти та інші (рис. 3).

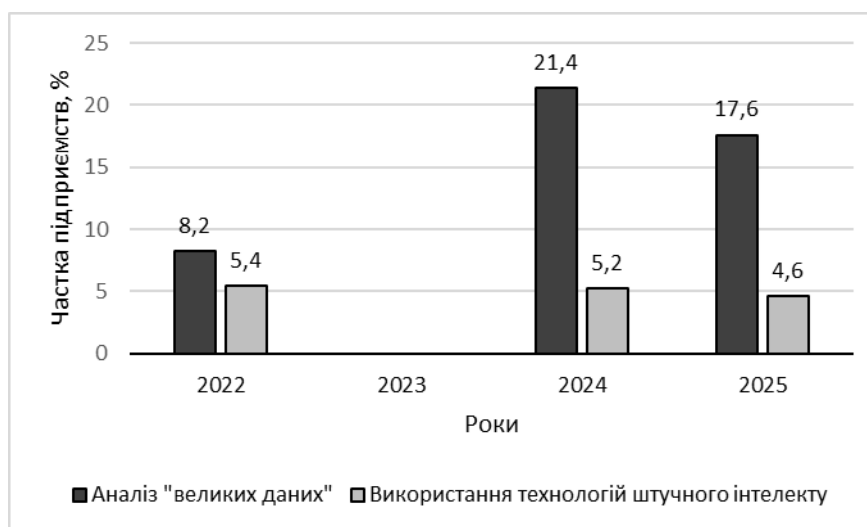


Рисунок 2 – Динаміка використання технологій “великих даних” та штучного інтелекту підприємствами України

Figure 2 – Dynamics of the use of big data and artificial intelligence technologies by Ukrainian enterprises

Джерело: сформовано автором за [9].



Рисунок 3 – Сучасні інформаційні інструменти та технології

Figure 3 – Modern information tools and technologies

Джерело: сформовано автором за [4, 6, 7].

Застосування технологій Big Data у транспортній галузі набуло особливої актуальності в останні роки. Big Data – це поняття, що означає сукупність підходів, методів та інструментів аналізу значних обсягів структурованих та неструктурованих даних, які не піддаються ефективній обробці традиційними засобами. Основними властивостями “великих даних” є постійне збільшення їх обсягу, що вимагає масштабованості, паралельних обчислень та розподіленості засобів роботи з Big Data.

Транспортні підприємства накопичують різноманітні дані, що дозволяє прогнозувати попит на перевезення, оптимізувати маршрути, підвищувати ефективність роботи, покращувати якість обслуговування, формувати нові послуги для клієнтів.

Основними типами даних, які збираються транспортними компаніями є:

- дані про технічний стан автомобіля, включаючи інформацію про характеристики двигуна, системи гальмування, електронних систем управління тощо;
- дані про рух автомобіля: до цієї категорії належить інформація щодо швидкості, подоланої відстані, тривалості поїздки, маршруту та геолокації транспортного засобу. Збір таких даних здійснюється за допомогою GPS-трекерів;
- дані про клієнтів: ця категорія включає відомості про клієнтів, їх контактні дані, інформацію про надання та оплату послуг;
- дані про водіїв: інформація про особисті дані водіїв, їх вік, стаж водіння, наявність правопорушень та аварій.

Основними перевагами використання технологій Big Data транспортними підприємствами є швидка окупність інвестицій, можливість швидкої адаптації до змін ринку, покращення сервісу.

Інтернет речей (IoT) – мережа фізичних об'єктів, що мають вбудовані технології, які дозволяють здійснювати взаємодію з зовнішнім середовищем, передавати відомості про свій стан і приймати дані ззовні. Дана технологія дозволяє відслідковувати місцезнаходження транспортних засобів, стан вантажу, автоматизувати процеси прийому, обробки та відвантаження вантажів, поведінку та стан водія. Впровадження таких систем підвищує безпеку перевезень, якість та точність доставки.

Використання штучного інтелекту відіграє значну роль в діяльності транспортних підприємств, дозволяючи знизити витрати та прискорити виробничі процеси. Дані технології дозволяють:

- оптимізувати маршрути: алгоритми машинного навчання здатні аналізувати дані про трафік, погодні умови, відстань та інші фактори з метою оптимізації маршруту, скорочення часу доставки, вартості;
- ефективно планувати складські запаси: алгоритми машинного навчання здатні більш точно прогнозувати необхідні ресурси, щоб ефективно розподілити їх і скоротити час простою;
- планування виробничих процесів: визначення оптимальних графіків роботи водіїв та використання транспорту.

Слід також відзначити можливість оптимізації митних процедур. Зокрема, послуги з митно-брокерського супроводу стають більш ефективними завдяки використанню аналізу даних, що дозволяє оперативніше готувати необхідну документацію та мінімізувати затримки на кордоні. Компанії, які впроваджують новітні інформаційні технології мають конкурентну перевагу і готові запропонувати вищий рівень обслуговування своїм клієнтам [7, 10].

Технології штучного інтелекту та машинного навчання включають штучні нейронні мережі.

Нейронні мережі являють собою адаптивні системи обробки і аналізу даних, основним елементом яких є формальний нейрон, що виконує операцію нелінійного перетворення суми добутку вхідних сигналів на вагові коефіцієнти. Обчислювальні можливості штучного нейрона визначаються певними правилами комбінації вхідних сигналів та функції активації, що дозволяє на основі множини вхідних сигналів відтворювати вихідний сигнал. На рис. 4 представлена спрощена схема будови штучного нейрону.

Сучасні штучні нейронні мережі характеризуються рядом властивостей, а саме здатністю до навчання, узагальнення та абстрагування. Процес навчання нейронної мережі розглядається як процес налаштування архітектури моделі та синаптичних ваг між обробними елементами (нейронами) з метою забезпечення ефективного виконання поставленого завдання. Налаштування здійснюється на основі даних, отриманих із зовнішнього середовища, які формують навчальну вибірку нейронної мережі. Застосування математичного апарату нейронних мереж дозволяють прогнозувати рівень завантаженості доріг, інтенсивності руху транспортних потоків, можливі затори [11].

Серед безумовних переваг застосування інформаційних технологій слід відзначити можливі ризики пов'язані зі збором та захистом даних:

- збір та зберігання великих обсягів даних може охоплювати персональну та конфіденційну інформацію, що потенційно дає змогу ідентифікувати користувачів створюючи загрози дискримінаційного характеру;

- “великі дані” можуть виявитися неповними, неточними, нерелевантними або недостовірними. Подібні недоліки часто зумовлені помилками під час збору інформації, недостатньою кількістю джерел даних, а також труднощами, що виникають у процесі обробки даних;

- зберігання великих обсягів даних може стати об’єктом кібератак, наслідком яких є витоки інформації та її подальше використання у злочинних цілях.

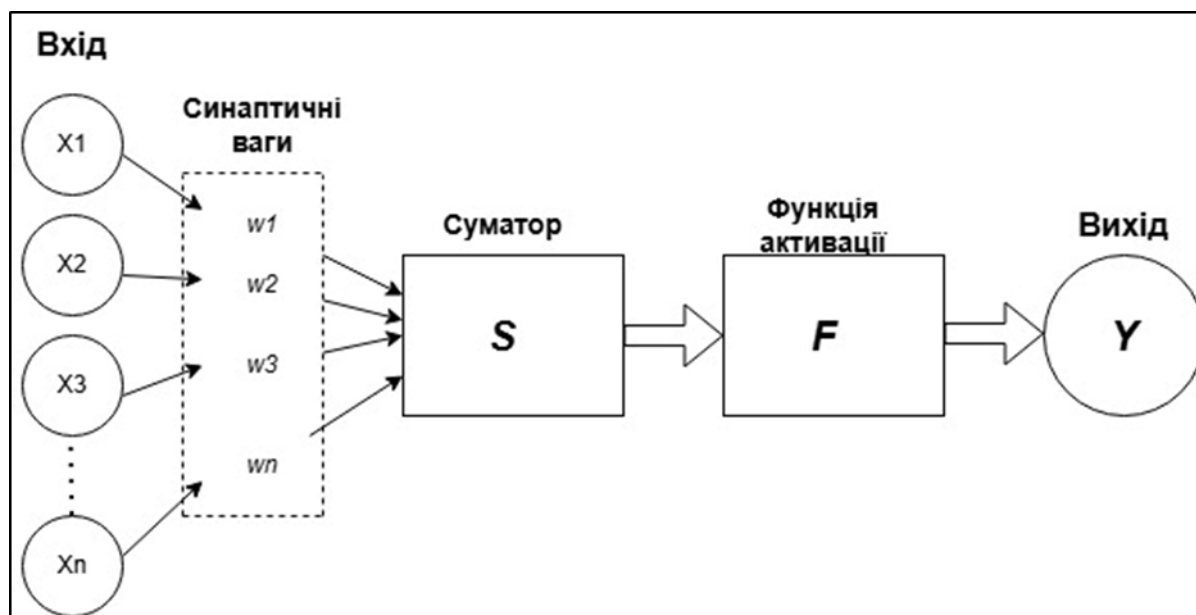


Рисунок 4 – Схема будови штучного нейрону

Figure 4 – Diagram of the structure of an artificial neuron

Джерело: сформовано автором за [11].

Основними заходами вирішення зазначених проблем є: шифрування даних та обмеження доступу до них для визначеного кола уповноважених осіб; забезпечення інформаційної безпеки, зокрема механізми автентифікації, авторизації; розробка та застосування методів та алгоритмів, здатних коригувати та підвищувати якість даних.

Отже, застосування новітніх інформаційних технологій таких як аналітика великих даних, штучний інтелект та машинне навчання, інтернет речей (IoT) створюють нові можливості для оптимізації маршрутів і виробничих процесів, зменшення витрат, підвищення безпеки перевезень, забезпечення конкурентоспроможності на національному та міжнародному ринках.

Висновки. Проаналізовано сучасний стан рівня забезпечення українських підприємств інформаційно-комунікативними засобами та технологіями. Так, за останні роки частка підприємств, що використовує соціальні медіа протягом останніх років майже не змінювалось і становила 30%. Проте, вдвічі зросла частка підприємств, які купували послуги хмарних обчислень та майже в три рази зросла частка підприємств, що використовує програмне забезпечення (ERP). Розглянуто основні напрямки та інструменти використання новітніх інформаційних технологій транспортними підприємствами, серед яких технології “великих даних”, штучний інтелект та машинне навчання, інтернет речей (IoT), електронна комерція, цифрові логістичні ланцюги, цифрові маркетингові інструменти та інші, а також обґрунтовано їх вплив на забезпечення конкурентоспроможності. Проаналізовано можливі ризики, що по’язані з впровадженням інформаційних технологій в діяльність

транспортних компаній. Результати дослідження дозволять забезпечити конкурентоспроможність, економічну та інформаційну безпеку підприємств транспортної галузі шляхом оптимізації виробничих процесів, підвищенню ефективності управління ресурсами, зниження витрат, підвищення безпеки перевезень.

Перелік посилань

1. Дубина М. В., Панченко Є. Г., Ткаченко І. А. Цифровізація економіки України: трансформаційні зміни у сфері управління. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2020. № 3. С. 345-357. DOI: <https://doi.org/10.21272/mmi.2020.3-25>
2. Levytska I. V., Klymchuk A. O., Klymchuk O. V. Functions of salary at machine-building enterprises in formation of motives and stimuluses of personnel. *Bulletin of Zaporizhzhia National University. Economic sciences*. № 4 (44), 2019. Pp. 154–159. DOI <https://doi.org/10.26661/2414-0287-2019-4-44-24>
3. Дяченко Т.О., Литвишко Л.О. Розвиток маркетингових послуг: стратегії та бізнес-планування на основі маркетингових показників та аналітики. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Вип. 116, Частина 2. Київ, 2024. С. 324-334. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/116.2/324.pdf DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.2-324-334
4. Литвишко Л.О., Михальський Є.В. Бізнес-аналітика в процесі стратегічного планування на ринку легкових автомобілів України: інструменти та підходи до ефективного управління підприємством. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. Вип. 118. Частина 1. НТУ: Київ, 2025. С. 281-292 DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.1-281-292
5. Пустовар С. Тенденції розвитку підприємництва в Україні в умовах Індустрії 4.0. *Економіка та суспільство*. 2022. № 39. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-15>
6. Воронкова В.Г. Бізнес-аналітика як стратегічний ресурс інформаційно-аналітичного забезпечення управління підприємствами в умовах цифрової трансформації. *Цифрова економіка та економічна безпека*. 8 Випуск 5(14) 2024. URL: <http://dees.iei.od.ua/index.php/journal/article/view/439>
7. I. Lee, and G. Mangalaraj Big data analytics in supply chain management: A systematic Literature Review and Research directions. *Big Data Cognitive. Computing*, 6(17), 2022.
8. S. S. Darvazeh, I. R. Vanani, and F. M. Musolu, F. M. Big data analytics and its application in supply chain management. *New Trends in the use of Artificial Intelligence for the Industry 4.0*, 2020.
9. Офіційний сайт Державної служби статистики України. Статистична інформація. URL : https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/oper_new.html
10. Bieliatynskyi, A., Bakulich, O., Samoilenko, Y., Holodenko, V., Kis, I. (2024). Application of Geoinformation Systems in Urban Environmental Management Projects. In: Faure, E., et al. Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 221. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_12
11. ZhukM., Pivtorak, H., & HitsI. (2022). Application of neural network modeling to forecasting the vehicle stay duration at the public transport stop. *Transport Development*, (1(12), 156-167. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.13>

ENSURING COMPETITIVENESS AND ECONOMIC SECURITY OF TRANSPORT ENTERPRISES THROUGH THE IMPLEMENTATION OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES

Malakhova Yuliia A., PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine., e-mail: yu.malakhova@ntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8769-7597>

Samoilenko Yevhen S., PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine., e-mail: ie.samoilenko@ntu.edu.ua, tel.+380988088008, <https://orcid.org/0000-0001-8352-2282>

Hrebelnyk Mykola M., Senior Lecturer of the Department of Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine., e-mail: m.hrebelnyk@ntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8385-8261>

Summary. Today, in the context of large-scale digitalization of most areas of economic activity, the use of modern information technologies is becoming the main factor in ensuring the competitiveness and economic security of enterprises. The article examines the current state of implementation of basic information and communication tools and technologies by enterprises in Ukraine. The share of enterprises that use ERP systems, cloud computing, social media, “big data” technologies and artificial intelligence in their activities is given. The main areas of use of modern information technologies by transport enterprises are indicated and their impact on ensuring competitiveness and economic security are substantiated. Possible risks associated with data collection and protection are analyzed, as well as prospects for the development of further implementation of information and communication technologies and tools.

Keywords: information technologies, enterprise competitiveness, transport industry, transport enterprise, digital tools, information security.

References

1. Dubyna M. V., Panchenko Ye. H., Tkachenko I. A. Digitalization of Ukraine's Economy: Transformational Changes in the Management Sphere. *Marketing and Management of Innovations*. 2020. No. 3. pp. 345–357. DOI: <https://doi.org/10.21272/mmi.2020.3-25>
2. Levytska I. V., Klymchuk A. O., Klymchuk O. V. Functions of salary at machine-building enterprises in formation of motives and stimuluses of personnel. *Bulletin of Zaporizhzhia National University. Economic sciences*. № 4 (44), 2019. Pp. 154–159. DOI <https://doi.org/10.26661/2414-0287-2019-4-44-24>
3. Dyachenko T.O., Lytvishko L.O. Development of marketing services: strategies and business planning based on marketing indicators and analytics. Scientific journal "Highways and Road Construction". Issue 116, Part 2. Kyiv, 2024. P. 324-334. DOI:10.33744/0365-8171-2024-116.2-324-334 [in Ukrainian]
4. Lytvishko L. O., Mykhalskyi Ye. V. Business Analytics in the Process of Strategic Planning in the Ukrainian Passenger Car Market: Tools and Approaches to Effective Enterprise Management. Scientific journal "Highways and Road Construction". Issue 118. Part 1. Kyiv, 2024. P. 281-292 DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.1-281-292 [in Ukrainian]
5. Pustovar S. Trends in the Development of Entrepreneurship in Ukraine under Industry 4.0 Conditions. *Economy and Society*. 2022. No. 39. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-15> [in Ukrainian]
6. Voronkova V.G. Business analytics as a strategic resource for information and analytical support of enterprise management in the context of digital transformation. *Digital Economy and Economic Security*. 8 Issue 5(14) 2024. URL: <http://dees.iei.od.ua/index.php/journal/article/view/439> [in Ukrainian]
7. I. Lee, and G. Mangalaraj Big data analytics in supply chain management: A systematic Literature Review and Research directions. *Big Data Cognitive. Computing*, 6(17), 2022.
8. S. S. Darvazeh, I. R. Vanani, and F. M. Musolu, F. M. Big data analytics and its application in supply chain management. *New Trends in the use of Artificial Intelligence for the Industry 4.0*, 2020.
9. Official website of the State Statistics Service of Ukraine. Statistical information. URL : https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/oper_new.html [in Ukrainian]
10. Bieliatynskyi, A., Bakulich, O., Samoilenko, Y., Holodenko, V., Kiss, I. (2024). Application of Geoinformation Systems in Urban Environmental Management Projects. In: Faure, E., et al. Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 221. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_12
11. Zhuk M., Pivtorak, H., & HitsI. (2022). Application of neural network modeling to forecasting the vehicle stay duration at the public transport stop. *Transport Development*, (1(12), 156-167. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.13>

Дата надходження до редакції 01.02.2022.

Дата прийняття статті після рецензування 20.02.2026.

УДК 656.07:005.591.6
UDK 656.07:005.591.6

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-420-431

УПРАВЛІНСЬКІ ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ З РОЗВИТКУ МЕРЕЖІ ЛОГІСТИЧНИХ ПОСТАВОК: РЕТРОСПЕКТИВА ТА ПРОГНОЗ

MANAGEMENT INNOVATION SOLUTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF LOGISTICS SUPPLY CHAIN: RETROSPECTIVE AND FORECAST



Порфіренко Володимир Іванович, кандидат економічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри менеджменту, e-mail: porfirenko@gmail.com, тел. +380 67 5034433, Україна, 01010, м. Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, к. 242.

<https://orcid.org/0000-0003-0329-6217>



Козаченко Анастасія Іванівна, студентка, Національний транспортний університет, e-mail: 16nastasya10@gmail.com, тел. +380 66 422 06 54, Україна, 01010, м. Київ, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, каб. 242. 16nastasya10@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-3844-8623>

Анотація. У статті досліджено динаміку змін міжнародних транспортних коридорів через територію України в період з 2010 по 2025 рік. Окремлено основні етапи трансформації логістичної інфраструктури під впливом геополітичних чинників, зокрема анексії Криму, війни на Донбасі, пандемії COVID-19 та повномасштабного вторгнення Російської Федерації у 2022 році. Особливу увагу приділено адаптації логістичних маршрутів до нових умов, розвитку альтернативних напрямків постачання, інтеграції з транспортною системою ЄС та створенню «розумної» логістики майбутнього. У висновках подано стратегічні рекомендації щодо модернізації та підвищення стійкості транспортної системи України.

Об'єкт дослідження: логістичні поставки продовольчих товарів в Україні (2010–2025 рр.).

Мета роботи: аналіз розвитку логістики та розробка рекомендацій для її оптимізації.

Ключові слова: логістика, продовольчі товари, система поставок, інновації в логістиці, цифровізація, холодова логістика, мультимодальні перевезення, гнучкість логістичних ланцюгів, адаптація до кризи, інтеграція з ЄС, транспортна інфраструктура, автоматизація складів, блокчейн, штучний інтелект, Україна.

Постановка проблеми. На тлі політичної нестабільності, військової агресії та глобальних логістичних викликів система транспортних коридорів України опинилася під критичним тиском. Втрата частини інфраструктури, зміна географії торговельних потоків та зростаюча потреба в євроінтеграції поставили перед Україною завдання не лише зберегти логістичну функціональність, а й трансформувати її відповідно до нових стандартів безпеки, ефективності та цифрової сумісності. Відсутність сталої стратегії логістичного розвитку, недостатня децентралізація та обмежене використання інновацій ускладнюють цю трансформацію, що зумовлює потребу у комплексному аналізі змін та розробці системних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У теоретичному вимірі розвиток логістичних систем в умовах турбулентності активно досліджується як українськими, так і зарубіжними вченими. Національні дослідники, зокрема Мельник Л.Г. та Балашов В.О., наголошують на необхідності адаптації логістики до невизначених і кризових умов, підкреслюючи значення гнучкості та інституційної підтримки.

Українські дослідження цих вчених:

- Мельник Л.Г. – «Логістика в умовах трансформаційної економіки...». Тут досліджується трансформація логістичних систем у період економічної нестабільності та роль екологізації, енергоефективності та цифрових інструментів у логістиці. [1]

- Балашов В.О. – «Гнучкість логістичних систем в умовах ризику та невизначеності». Спеціалізується на гнучкості логістичних систем в умовах криз і ризиків. Він пропонує концепцію адаптивної логістики та управління ризиками в логістичних ланцюгах. Особливу увагу приділяє організаційній та інституційній підтримці змін у логістичних структурах.[2]

Зарубіжні вчені, такі як Martin Christopher (Велика Британія), розвинули концепцію «resilient supply chains» – тобто стійких і гнучких ланцюгів поставок, що здатні швидко відновлюватися після збоїв. Водночас Dimitri Ivanov (Німеччина) запропонував математичні моделі прогнозування логістичних ризиків, які стали особливо актуальними після початку пандемії COVID-19 і війни в Україні. [3]

Основна частина. В умовах глобальних змін, що охопили як українську економіку, так і світову господарську систему, управління логістичними ланцюгами набуло стратегічної значущості. Сьогодні логістика вийшла за межі простого транспортування або зберігання товарів — вона стала ключовою опорою для сталого функціонування бізнес-структур, державного сектору, оборонної сфери та гуманітарних програм. Інновації в логістичних мережах дозволяють швидше адаптуватися до викликів, зменшувати рівень ризиків та гарантувати стабільність у непередбачуваних обставинах. [4]

До 2013 року українська система постачання переважно спиралася на централізовану модель розподілу, де головну роль відігравали великі складські комплекси — зазвичай пов'язані з виробниками або імпортерами. Основний обсяг перевезень здійснювався автомобільним транспортом, що забезпечував національне покриття. Імпорт продовольства переважно здійснювався з країн Європейського Союзу, Російської Федерації, Білорусі та Туреччини.[4]

На той час логістичні процеси здебільшого базувалися на ручному управлінні: складування, контроль залишків, транспортування виконувалися з мінімальним рівнем автоматизації. Основні національні торговельні мережі — такі як «АТБ», «Сільпо», «Фора», «Метро» — володіли власними логістичними потужностями, проте технологічний рівень їх роботи залишався невисоким. Часто продукти транспортували без дотримання температурного режиму, що погіршувало якість швидкопсувної продукції.

Ринкові точки збуту, зокрема стихійні базари на кшталт «Привозу», «Троєщини» чи «Столичного», не мали формалізованої логістики. Постачання відбувалося нерегулярно, без сертифікації та з великою залежністю від сезонних факторів. Такі канали збуту були ключовими для дрібних сільськогосподарських виробників.

Цифрові технології в логістиці на той час практично не використовувались. Переважна більшість операцій велася вручну або у паперовому вигляді, що стримувало швидкість та точність управління ланцюгами постачання.

Після початку військових дій на сході України та анексії Криму у 2014 році логістичні системи країни зазнали суттєвої перебудови. Було втрачено важливі складські комплекси, розташовані в Донецькій, Луганській областях та в Автономній Республіці Крим, що призвело до розриву налагоджених ланцюгів постачання. Транспортні маршрути, які до того часу проходили переважно через східні регіони, почали втрачати свою актуальність, що змусило компанії шукати альтернативи. [4]

Реорганізація маршрутів сприяла зростанню значення західного вектору. Польща, Угорщина, Литва та Румунія стали новими стратегічними «воротами» для торгівлі та транспорту. Зросли витрати на перевезення, а логістичні об'єкти перемістились до центральних і західних регіонів України.

Одним із ключових напрямів розвитку стала модернізація систем холодового зберігання. Помітно збільшилась кількість складських приміщень із холодильним обладнанням, а також автопарків із рефрижераторними транспортними засобами. Впровадження систем управління складом (Warehouse Management System — WMS) стало поширеною практикою серед великих торговельних мереж. Компанії активніше використовували сканери, автоматичний контроль партій товару, системи трекінгу.

Новий виток змін приніс 2020 рік, коли пандемія COVID-19 викликала глобальну логістичну кризу. Локдауни, обмеження на пересування та закриття кордонів паралізували традиційні шляхи постачання. Це стало поштовхом до активного переходу до гнучких, децентралізованих моделей логістики.

Електронна комерція, автоматизація логістичних центрів, мобільні додатки для трекінгу, прогнозування попиту та інші цифрові інструменти стали основою нової парадигми. Виникла потреба в розробці систем, здатних функціонувати навіть при обмеженому фізичному контакті між учасниками процесу.

Ключові зміни періоду пандемії:

- Різке зростання попиту на доставку продуктів через сервіси типу Glovo, Zakaz.ua, Raketa;
- Активне впровадження безконтактної логістики в супермаркетах;
- Створення великої кількості автоматизованих центрів сортування поблизу мегаполісів;
- Поширення холодильних логістичних об'єктів, які гарантували відповідні умови зберігання;
- Масовий перехід компаній на цифрові системи замовлення, відстеження та керування запасами. [4]

Особливо показовим став досвід компанії «Нова пошта», яка не лише збільшила кількість відділень, а й запровадила інноваційні рішення — автоматизовані поштомати, мобільні застосунки, ШІ-модулі для побудови маршрутів. Це дозволило гарантувати безперебійну доставку навіть за умов карантинних обмежень. [5]



Рисунок 1— 21 квітня – 57-ма доба повномасштабного російського вторгнення.

Ситуація в Маріуполі

Figure 1— April 21 – Day 57 of the full-scale Russian invasion. Situation in Mariupol

З початком повномасштабного вторгнення РФ у лютому 2022 року логістична система України зіткнулась з безпрецедентною кризою. Значна частина інфраструктури — залізничні вузли, мости, дороги, склади, логістичні термінали — була знищена, окупована або перебувала під прямою загрозою атак. Звичні ланцюги поставок були порушені, а деякі напрямки повністю заблоковані.[6]

У таких надзвичайних умовах логістика швидко перетворилась із виключно економічної категорії на критичний елемент державної безпеки, гуманітарного забезпечення та оперативної мобільності. Ключовими характеристиками стали оперативність, гнучкість та децентралізація.[6]

З'явилися нові логістичні формати:

- Гуманітарні коридори та спеціальні евакуаційні маршрути;
- Мобільні склади, що дозволяли зберігати та розподіляти товари навіть у зонах підвищеного ризику;
- Альтернативні канали постачання, які обходили небезпечні регіони — наприклад, через західні кордони з Польщею, Словаччиною, Румунією.

В умовах постійних ризиків багато компаній перейшли на динамічні моделі планування: маршрути формувались у реальному часі з урахуванням обстрілів, блокпостів, пошкоджень доріг. Важливим трендом стала «доставка останньої милі», яка передбачала швидке довозення товарів безпосередньо до магазинів або споживачів — навіть за допомогою велосипедів, мотоциклів, дронів.[6]

Мережі супермаркетів на кшталт «АТБ», «Сільпо», «Varius» стали головними дистриб'юторами продуктів харчування у містах. У той же час ринки значно втратили свої позиції через проблеми з безпекою, логістикою та скороченням постачальників на Сході та Півдні.

Ключові тенденції цього етапу:

- Розширення ролі гуманітарних логістичних хабів, які координували постачання між регіонами;
- Застосування транспорту малої вантажності, що міг працювати в складних умовах;
- Акцент на технологічну адаптивність — цифрові системи дозволяли реагувати на зміни миттєво;
- Фокус на сервісі, які працюють 24/7 навіть під час повітряних тривог або блекаутів.



Рисунок 2 – Smart-рампи - рішення, яке поєднує в собі розумні технології та логістичні процеси для оптимізації руху товарів у логістичних комплексах

Figure 2 – Smart ramps - a solution that combines smart technologies and logistics processes to optimize the movement of goods in logistics complexes

До 2025 року логістична система України трансформувалася у глибоко перебудовану цифрову мережу, орієнтовану на європейські стандарти та принципи стійкості. Впроваджувалися новітні технології, серед яких:

- Системи штучного інтелекту для управління запасами та прогнозування попиту;
- Блокчейн-рішення для забезпечення прозорості ланцюга «від виробника до споживача»;
- Smart-склади зі сенсорами температури, вологості, GPS-контролем;

- Мікро-фулфілмент-центри, розташовані в безпосередній близькості до споживачів, що зменшували час доставки;
- Використання електротранспорту та технологій еко-доставки задля зниження впливу на довкілля.

Таким чином, з 2022 по 2025 рік українська логістика пройшла шлях від реагування на катастрофу — до побудови сучасної, цифрової, децентралізованої та євроінтегрованої інфраструктури, що поєднує як бізнес-інтереси, так і національну безпеку. [7]

Цифровізація логістики

Попри очевидні переваги цифровізації логістики, інноваційний розвиток цієї сфери стикається з рядом суттєвих викликів.

Основні недоліки:

1. Висока вартість впровадження технологій.
 - Інтеграція систем автоматизації, розгортання IoT-рішень, закупівля роботизованих платформ вимагає значних фінансових витрат. Це особливо складно для малого та середнього бізнесу, який не має доступу до дешевих кредитів чи грантових програм.
 - Наслідок: посилення логістичної нерівності між регіонами та сегментами економіки.[7]
 2. Кадрова та технічна неготовність.
 - Більшість компаній функціонує на застарілій технічній базі, а персонал має обмежені навички роботи з цифровими платформами;
 - Брак фахівців із цифрових технологій у логістиці, зокрема WMS, TMS, Big Data, ускладнює впровадження новацій.
 3. Залежність від стабільного цифрового середовища.
 - Безперебійна робота цифрових систем вимагає постійного доступу до електроенергії, інтернету та хмарних сервісів. В умовах війни ці ресурси часто є нестабільними або взагалі відсутні;
 - Це ставить під загрозу безперервність логістичних операцій навіть на базовому рівні.[7]
 4. Зростання ризиків кіберзагроз.
 - Інтеграція цифрових рішень робить логістичні системи вразливими до кібератак, втрати даних, саботажу;
 - Відсутність належного кіберзахисту ускладнює захист логістичних хабів, особливо при централізованій структурі управління.[7]
 5. Невідповідність цифрових платформ і відсутність стандартів.
 - Уніфікація цифрових інструментів залишається нерозв'язаною проблемою. Компанії часто впроваджують власні несумісні системи без інтеграції з партнерами;
 - У результаті виникають проблеми з обміном інформацією, дублюванням функцій та помилками у синхронізації даних.[7]
 6. Ризики надмірної автоматизації.
 - Повна цифровізація без резервного плану чи людського контролю може створити ризик втрати адаптивності — зокрема у випадку збоїв систем ШІ або непередбачених ситуацій;
 - Людський фактор лишається критично важливим для прийняття рішень у складних умовах.[7].
- Транспортні коридори через Україну: динаміка змін (2010–2025)[8]*
- У період з 2010 по 2025 рік територія України залишалась ключовим транспортно-логістичним перехрестям між Європейським Союзом, Азією та країнами Кавказу. Протягом цього часу роль міжнародних транспортних коридорів зазнала суттєвих трансформацій, обумовлених як внутрішніми реформами, так і зовнішніми політичними та військовими факторами. [8]
- 2010–2013: Стабільна інтеграція у європейську транспортну систему
- До початку конфлікту на сході країни Україна активно інтегрувалася до загальноєвропейської транспортної мережі (TEN-T). Основними маршрутами виступали транспортні коридори №3, №5, №7 і №9, які забезпечували зв'язок Балтії з Адріатикою, Чорним морем та Середземномор'ям. Також

активно функціонував маршрут TRACECA, який сполучав Китай, Центральну Азію, Кавказ і країни Східної Європи, проходячи через українські морські порти.

Таблиця 1– Основні проблеми інноваційної логістики та можливі рішення

Table 1– Main problems of innovative logistics and possible solutions

Недолік	Можливе вирішення
Висока вартість впровадження новітніх технологій	Державне фінансування, пільгові кредити, партнерство з приватним сектором
Технічна неготовність підприємств до цифровізації	Поступове впровадження ІТ-рішень, оновлення технічної бази
Недостатній рівень цифрових навичок у працівників	Проведення тренінгів, освітніх програм, підвищення кваліфікації
Залежність від інтернету та електропостачання	Використання резервного живлення, супутникового інтернету, локальних серверів
Зростання кіберзагроз	Впровадження кіберзахисту, шифрування, резервного копіювання та систем безпеки
Відсутність спільних стандартів у логістичних ланцюгах	Розробка єдиних стандартів, створення спільних цифрових платформ
Несумісність цифрових систем	Впровадження відкритих API, уніфікація архітектури, інтеграційні модулі
Помилки в системах на базі ІІІ та Big Data	Стандартизація даних, оновлення аналітики, покращення моделей
Втрата гнучкості через повну автоматизацію	Використання гібридних систем, збереження ручного контролю на ключових етапах



Рисунок 3 – Еволюція міжнародних транспортних коридорів України, 2010-2025

Figure 3 – Evolution of international transport corridors in Ukraine, 2010-2025

2014–2021: Реконфігурація маршрутів у відповідь на конфлікт

Після анексії Криму та початку воєнних дій на Донбасі Україна втратила частину транспортної інфраструктури, зокрема доступ до портів у Севастополі та Керчі. Це спричинило переорієнтацію вантажопотоків на захід, північ та південь. Значну роль почали відігравати порти Одеси, Чорноморська, Південного, а також залізничне сполучення через Львівщину та Закарпаття. Пріоритетом стало розширення прикордонної інфраструктури з Польщею, Словаччиною, Угорщиною та Румунією. [8]

2022–2025: Переорієнтація логістичних потоків в умовах війни

Повномасштабне вторгнення РФ у 2022 році спричинило знищення або блокаду критичних ділянок транспортної системи в центральних та східних регіонах. У відповідь Україна активізувала розвиток альтернативних маршрутів. Зокрема, Дунайські порти (Ізмаїл, Рені, Усть-Дунайськ) стали новими стратегічними хабами для експорту, особливо агропродукції. Також спільно з ЄС запроваджено ініціативу «Solidarity Lanes», яка дозволила забезпечити вивезення продукції через сухопутні та річкові маршрути.[8]

Таблиця 2 – Основні зміни транспортних коридорів через Україну (2010–2025)

Table 2 – Main changes in transport corridors through Ukraine (2010–2025)

Параметр	2010	2025
Основні напрямки	РФ, ЄС, Чорне море	ЄС, Дунай, Кавказ
Кількість стабільних коридорів	7	4 активних, 2 пошкоджених
Морська логістика	Одеса, Чорноморськ, Маріуполь	Порти Дунайського кластеру
Залізничне сполучення	Схід-Захід, Південь-Північ	Захід-Центр, адаптація до європейських стандартів
Вплив політики	Помірний	Критичний: війна + геополітика

У підсумку, за п'ятнадцять років Україна пройшла глибоку трансформацію у сфері транспортної логістики — від східноорієнтованої моделі до гнучкої західної системи з підтримкою міжнародних партнерів. Ці зміни не лише зберегли функціональність логістики у надзвичайних умовах, а й створили фундамент для інтеграції до транспортної системи ЄС. [8]

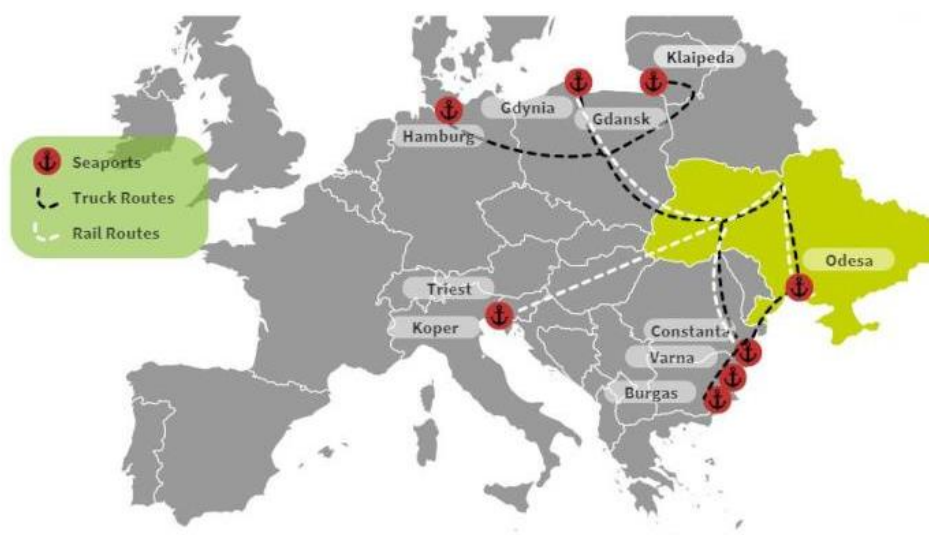


Рисунок 4 – Сучасна транспортна мережа із акцентом на логістичні зміни під час війни

Figure 4 – Modern transportation network with emphasis on logistical changes during wartime

Інфографіка ілюструє, як Україна переорієнтувала свої транспортні потоки — активізуючи західні кордони і нарошуючи зв'язок з ЄС, при цьому адаптуючи інфраструктуру. [8]

Станом на 2025 рік система логістики в Україні функціонує в умовах високої турбулентності, обумовленої війною, нестабільною економікою, інфраструктурними втратами та зростанням попиту на швидке, безпечне постачання товарів. Тому формування ефективної логістичної стратегії має враховувати не лише оперативні потреби бізнесу, але й стратегічні національні інтереси. Нижче наведено ключові пропозиції з оптимізації логістичних ланцюгів: [9]

1. Регіоналізація логістичної інфраструктури.

Україна традиційно має надмірну концентрацію логістичних хабів у центральному регіоні (особливо навколо Києва). Така централізована модель виявилась вразливою до зовнішніх ризиків. Оптимальним кроком є розподіл логістичних потужностей на макрорегіональному рівні — у Західному, Північному, Центральному, Південному та Східному кластерах.

Очікувані результати:

- Зменшення навантаження на національні перевізні артерії;
- Скорочення часу доставки;
- Вища адаптивність під час надзвичайних подій.

2. Державна стратегія логістичного розвитку.

Необхідне затвердження комплексної логістичної політики України, яка включатиме:

- розвиток інфраструктури;
- цифровізацію;
- безпекові аспекти;
- стандартизацію логістичних процесів;
- підтримку інновацій у секторі.

Це має виглядати як міжвідомча дорожня карта до 2030 року з чіткими KPI, бюджетами та джерелами фінансування.[9]

3. Масштабна цифровізація та інтелектуалізація.

Цифрові рішення є основою сучасної логістики. Українським компаніям потрібно впроваджувати:

- ERP-системи для управління ресурсами;
- WMS і TMS для обліку і маршрутизації;
- IoT-рішення для моніторингу в реальному часі;
- Big Data для прогнозування попиту та запасів;
- Блокчейн для прозорості операцій;
- AI-модулі для сценарного планування.

Переваги: зниження людського фактора, скорочення витрат, аналітичне управління ризиками.[9]

4. Мультимодальні логістичні центри.

Україні необхідно синхронізувати транспортні системи — автомобільну, залізничну, річкову, морську та повітряну. Для цього слід:

- створити мультимодальні платформи в портових містах (Одеса, Ізмаїл);
- оснастити вузли вантажоперевантажувальним обладнанням;
- інтегрувати митне оформлення у цифровому форматі.

Це дозволить знизити витрати на імпорт/експорт та посилить транзитну привабливість країни.

5. Посилення гнучкості та кризостійкості.

Оптимізація логістики має спиратися на сценарне планування і створення резервних маршрутів. Доцільно впровадити:

- гібридні моделі (власна + аутсорсингова логістика);
- платформи швидкої координації доставки;
- мобільні склади для екстрених ситуацій.

6. Пріоритет холодової логістики.

Для збереження якості продуктів, медикаментів і вакцин слід розширити мережу холодових логістичних об'єктів, зокрема:

- сертифіковані склади з температурним контролем;
- рефрижераторні автомобілі;
- системи моніторингу на базі IoT.

7. Уніфікація стандартів та платформ.

Необхідно забезпечити сумісність між усіма учасниками ринку:

- стандартизація цифрового документообігу (EDI);
- відкриті API для інтеграції систем;
- єдина державна логістична платформа.

8. Професійна підготовка логістичних кадрів.

Розвиток логістики неможливий без підготовки нової генерації спеціалістів:

- оновлення освітніх програм у вишах;
- національні курси підвищення кваліфікації;
- онлайн-сертифікації для логістів, диспетчерів, транспортних аналітиків.[9]

9. Розвиток «зеленої логістики».

Екологізація має стати одним із векторів модернізації:

- впровадження електровантажівок, біопалива;
- енергоефективні склади;
- підтримка зворотної логістики (повернення тари, вторинне використання упаковки).

10. Євроінтеграція логістичних процесів.

Інтеграція до логістичної системи ЄС вимагає:

- гармонізації інфраструктури з мережею TEN-T;
- адаптації митного та прикордонного контролю;
- підключення до європейських платформ (DB Schenker, Amazon Logistics тощо). [9]

Таблиця 3 – Основні напрями оптимізації та відповідні дії [10]

Table 3 – Main areas of optimization and corresponding actions [10]

Пропозиція щодо оптимізації	Що потрібно зробити
Децентралізація логістичних хабів	Створити регіональні склади та логістичні центри у кожному макрореґіоні для зниження залежності від центру
Єдина державна стратегія розвитку логістики	Розробити та затвердити національну логістичну стратегію до 2030 року з конкретними інфраструктурними проєктами
Цифровізація ланцюгів поставок	Впровадити ERP, WMS, TMS, IoT, аналітику даних, автоматизований документообіг і моніторинг [10]
Оптимізація мультимодальних перевезень	Збудувати мультимодальні логістичні центри з доступом до залізниці, морських та річкових портів
Підвищення гнучкості логістичних систем	Розробити резервні маршрути, запровадити гібридні моделі, сценарне планування та аварійні протоколи
Розвиток холодової логістики	Побудувати сертифіковані холодові склади, закупити рефрижератори, впровадити контроль температури в режимі реального часу
Уніфікація логістичних стандартів	Створити національну цифрову платформу з відкритими API, підтримкою EDI та сумісністю між учасниками ланцюга[10]
Підготовка нових логістичних кадрів	Актуалізувати навчальні програми, створити онлайн-курси, центри перекваліфікації, залучити бізнес до освіти
Екологічна логістика	Запровадити використання електротранспорту, розвиток зеленої інфраструктури, повторне використання упаковки
Інтеграція до логістичної системи ЄС	Уніфікувати інфраструктуру з мережею TEN-T, синхронізувати митні процедури, адаптувати цифрові стандарти[10]

Прогноз розвитку логістики в Україні до 2030 року [11]

Очікується, що в найближче десятиліття логістика в Україні набиратиме ознак "розумної" (smart) моделі, де ключовими характеристиками будуть:

- Цифрова інтегрованість усіх етапів поставок — від виробника до споживача;
- Мережевий підхід до логістичних систем, із перевагою децентралізованих та регіональних центрів;
- Прозорість і простежуваність завдяки технологіям блокчейну;
- Високий ступінь автоматизації завдяки впровадженню робототехніки у логістичні центри;
- Гнучкість маршрутизації і планування, базована на реальному попиті та змінності середовища;
- Екологічність і стійкість за рахунок електротранспорту, повторного використання упаковки та зменшення вуглецевого сліду;
- Глибока інтеграція з логістичними системами ЄС та міжнародними логістичними платформами.[11]

Водночас Україна зберігає значний транзитний потенціал, особливо у сфері аграрної продукції, промислових товарів та фармацевтики. Повноцінне розкриття цього потенціалу можливе лише за умови реалізації стратегії національної логістичної модернізації, що включатиме фінансування критичної інфраструктури, гармонізацію з європейськими стандартами, а також розвиток людського капіталу в галузі. [11]

Висновок

У період з 2010 по 2025 роки система логістичних поставок в Україні зазнала глибокої трансформації. Від централізованої, частково ручної моделі логістика еволюціонувала до децентралізованої, цифрової, кризостійкої системи, яка активно впроваджує інновації та адаптується до нових глобальних і внутрішніх викликів. Цей процес був зумовлений як загальноекономічними змінами, так і геополітичними потрясіннями, зокрема війною, порушенням ланцюгів постачання та необхідністю забезпечення продовольчої безпеки держави.

Одним із ключових чинників цієї трансформації стала здатність логістичних систем адаптуватися до невизначеності, зберігаючи при цьому безперервність постачання. В умовах пандемії COVID-19, військової агресії, руйнування інфраструктури, ринкових шоків та зміни споживчої поведінки логістика виступила не лише функціональним елементом бізнесу, а й важливою складовою соціальної стійкості країни.

Розвиток інноваційних технологій (WMS, ERP, IoT, Big Data, блокчейн, AI), децентралізація складів, зростання ролі мультимодальних перевезень та впровадження «зеленої логістики» стали основою нового етапу модернізації. Логістичні компанії поступово переходять від реактивної моделі до прогностичного управління, де аналітика і цифрові системи формують рішення в реальному часі.

Водночас аналіз показав наявність суттєвих бар'єрів: висока вартість технологій, нестача кваліфікованих кадрів, фрагментація стандартів, кіберзагрози, а також недостатня синергія між державою, бізнесом та освітнім середовищем. Подолання цих викликів потребує комплексної логістичної політики, активної участі публічного сектору та розвитку партнерських екосистем.

Отже, логістика в Україні пройшла шлях від технічно відсталого моделі до сучасної, стратегічно значущої сфери, яка визначає стійкість економіки, безперебійність постачання та соціальну стабільність. Сформовані на основі аналізу пропозиції з оптимізації дозволяють окреслити чіткий вектор розвитку: відновлення, модернізація, цифровізація, інтеграція, стійкість.

Майбутнє логістики України — це інтелектуальні, гнучкі та екологічно відповідальні системи, здатні ефективно функціонувати в умовах високої мінливості та викликів. Це вимагатиме не лише технологічних змін, але й стратегічного переосмислення ролі логістики як інфраструктури національного значення.

Перелік посилань

1. Мельник Л.Г., Іванов С.О. Логістика: теорія і практика. – К.: Центр учбової літератури, 2020. – 416 с.
2. Балашов В.О. Управління логістичними системами в умовах кризи. – Дніпро: Національний гірничий університет, 2022. – 268 с.
3. Christopher M. Logistics & Supply Chain Management. – 5th ed. – Pearson Education Limited, 2016. – 300 p.
4. Deloitte Ukraine. Цифрова трансформація ланцюгів постачання в Україні, 2021. – [Електронний ресурс]. – <https://www2.deloitte.com/ua/uk/pages/about-deloitte/articles/digital-supply-chain.html>
5. Звіт компанії «Нова пошта» про розвиток логістичної інфраструктури в Україні (2022–2024 рр.). – [Електронний ресурс]. – <https://novaposhta.ua>
6. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. (2023). Звіт про розвиток транспортної інфраструктури та логістичних коридорів України у співпраці з ЄС. <https://mindev.gov.ua/>
7. McKinsey & Company. Digital logistics: Technology race gathers momentum, 2023. – [Електронний ресурс]. – <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/digital-logistics-technology-race-gathers-momentum>
8. Центр транспортних стратегій. Транспортні коридори України: поточний стан і перспективи, 2024. – [Електронний ресурс]. – https://cfts.org.ua/publications/transportni_korydory_ukrainy_stan_ta_perspektyvy
9. Deloitte Ukraine. Аналітика ринку логістики та e-commerce в Україні: виклики, тренди та рішення. – 2023. – [Електронний ресурс]. – <https://www2.deloitte.com/ua>
10. PwC. Digital transformation in logistics: Enabling efficiency and cost reduction, 2021. – [Електронний ресурс]. – <https://www.pwc.com/gx/en/industries/transportation-logistics/publications/digital-logistics.html>
11. Стратегія розвитку логістики в Україні до 2030 року. – Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/>

MANAGEMENT INNOVATION SOLUTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF LOGISTICS SUPPLY CHAIN: RETROSPECTIVE AND FORECAST

Porfirenko Volodymyr I., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Management Department, e-mail: porfirenko@gmail.com, tel. +380 67 503 44 33, Ukraine, 01010, Kyiv, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka St., 1, office 242. <https://orcid.org/0000-0003-0329-6217>.

Kozachenko Anastasiia I., student, National Transport University, e-mail: 16nastasya10@gmail.com, tel. +380 68 327 36 91, Ukraine, 01010, Kyiv, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka St., 1, office 242. <https://orcid.org/0000-0002-3844-8623>.

Abstract. The article examines the dynamics of changes in international transport corridors through the territory of Ukraine from 2010 to 2025. The main stages of the transformation of the logistics infrastructure under the influence of geopolitical factors are outlined, including the annexation of Crimea, the war in Donbas, the COVID-19 pandemic, and the full-scale invasion of the Russian Federation in 2022. Particular attention is paid to the adaptation of logistics routes to new conditions, the development of alternative supply directions, integration with the EU transport system, and the creation of “smart” logistics of the future. The conclusions provide strategic recommendations for the modernization and strengthening of the resilience of Ukraine’s transport system.

Object of the research: logistics supply chains of food products in Ukraine (2010–2025).

Purpose of the work: analysis of the development of logistics and development of recommendations for its optimization.

Research methods are statistical and comparative methods.

Keywords: logistics, food products, supply chain system, logistics innovations, digitalization, cold chain logistics, multimodal transportation, supply chain resilience, crisis adaptation, EU integration, transport infrastructure, warehouse automation, blockchain, artificial intelligence, Ukraine.

References

1. Melnyk L.H., Ivanov S.O. Logistics: Theory and Practice. Kyiv: Center for Educational Literature, 2020. 416 p. [in Ukrainian]
2. Balashov V.O. Management of Logistics Systems in Times of Crisis. Dnipro: National Mining University, 2022. 268 p. [in Ukrainian]
3. Christopher M. Logistics & Supply Chain Management. 5th ed. Pearson Education Limited, 2016. 300 p.
4. Deloitte Ukraine. Digital Transformation of Supply Chains in Ukraine, 2021. [Electronic resource]. <https://www2.deloitte.com/ua/uk/pages/about-deloitte/articles/digital-supply-chain.html>
5. Nova Poshta. Report on the Development of Logistics Infrastructure in Ukraine (2022– 2024). [Electronic resource]. <https://novaposhta.ua> [in Ukrainian]
6. Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. (2023). Report on the Development of Transport Infrastructure and Logistics Corridors of Ukraine in Cooperation with the EU. <https://mindev.gov.ua/> [in Ukrainian]
7. McKinsey & Company. Digital Logistics: Technology Race Gathers Momentum, 2023. [Electronic resource]. <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/digital-logistics-technology-race-gathers-momentum/>
8. Center for Transport Strategies. Transport Corridors of Ukraine: Current State and Prospects, 2024. [Electronic resource]. Deloitte Ukraine. Analytics of the Logistics and E-Commerce Market in Ukraine: Challenges, Trends and Solutions, 2023. [Electronic resource]. <https://www2.deloitte.com/ua/> [in Ukrainian]
9. PwC. Digital Transformation in Logistics: Enabling Efficiency and Cost Reduction, 2021. [Electronic resource]. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/transportation-logistics/publications/digital-logistics.html>
10. Logistics Development Strategy of Ukraine until 2030. Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. [Electronic resource]. <https://www.minregion.gov.ua/> https://cfts.org.ua/publications/transportni_korydory_ukrainy_stan_ta_perspektyvy
11. Center for Transport Strategies. Transport Corridors of Ukraine: Current State and Prospects, 2024. [Electronic resource]. https://cfts.org.ua/publications/transportni_korydory_ukrainy_stan_ta_perspektyvy [in Ukrainian]

Дата надходження до редакції 03.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 20.02.2026.

УДК 656.1/5:330.554
UDC 656.1/5:330.554

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-432-443

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТРАНЗИТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ ТА ВІЙНИ

STATISTICAL ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF UKRAINE'S TRANSIT INFRASTRUCTURE IN THE CONDITIONS OF EUROPEAN INTEGRATION AND WAR



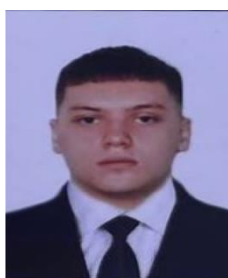
Хобта Михайло Олексійович, кандидат економічних наук, доцент кафедри «Менеджмент». Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: m.khobta@ntu.edu.ua, тел. +380442808438

<https://orcid.org/0000-0002-6505-9092>



Сукманюк Вікторія Михайлівна, асистент кафедри «Менеджмент». Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: v.sukmaniuk@ntu.edu.ua, тел. +380442808438

<https://orcid.org/0000-0003-4202-8960>



Третяк Дмитро Сергійович, здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 073 «Менеджмент» кафедри логістики та проєктного менеджменту, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: dmitrii1995tret@gmail.com, тел. +380989780047

<https://orcid.org/0009-0003-1542-0884>

Анотація. Стаття присвячена комплексному аналізу української транспортно-логістичної системи в умовах повномасштабної війни та поглиблення інтеграції з Європейським Союзом. У статті досліджено масштабні структурні зміни в транзитних потоках, динаміку вантажоперевезень різними видами транспорту, а також сучасні тенденції розвитку прикордонної інфраструктури. Особлива увага приділена перегляду європейської транспортної політики, розширенню мережі TEN-T за участі України, залученню інвестиційних ресурсів ЄІБ та ефективності програм «Коридори солідарності». На основі офіційних статистичних даних, міжнародних звітів та урядових документів досліджено масштаб економічних втрат транспортного сектору, зокрема руйнування інфраструктурних об'єктів, скорочення обсягів вантажоперевезень та зміну структури логістичних потоків у 2021–2024 роках. Проведено порівняльний аналіз обсягів залізничних, автомобільних, морських, річкових та авіаційних перевезень до та після 2022 року, що дозволило визначити ключові чинники падіння та подальшого відновлення сектору.

У статті показано, що залізничний та морський транспорт зазнали найбільших втрат, однак завдяки переорієнтації на західний напрямок, активізації транскордонних перевезень та створенню нових логістичних маршрутів у 2023–2024 роках спостерігається поступове відновлення

вантажопотоків. Окремо досліджено позитивну динаміку інтермодальних та контейнерних перевезень, що свідчить про посилення ролі України у європейських ланцюгах постачання. Зроблено висновок, що розвиток транзитної інфраструктури, модернізація прикордонних переходів, включення України до оновленої мережі TEN-T та розширення співпраці з Польщею, Румунією, Словаччиною та Угорщиною формують стратегічну основу для довгострокової інтеграції транспортної системи України з європейським ринком та забезпечують підвищення її ролі як ключового транзитного центру Східної Європи.

Ключові слова: транзитна інфраструктура; статистичний аналіз; логістика; транспортні коридори; євроінтеграція; воєнний стан; міжнародні вантажопотоки; транспортна система України.

Вступ. Транзитна інфраструктура України є ключовим елементом формування міжнародної конкурентоспроможності держави, забезпечення зовнішньоекономічної діяльності та інтеграції у європейський транспортний простір. До 2022 року Україна відігравала роль важливого транзитного вузла між ЄС та країнами Азії, маючи розгалужену систему морських портів, залізничних коридорів, автомобільних перевезень і значний логістичний потенціал. Проте повномасштабна військова агресія Російської Федерації спричинила безпрецедентні втрати для всієї транспортної інфраструктури, зумовила різку зміну логістичних маршрутів, блокаду портів, падіння обсягів транзиту та переорієнтацію транспортних потоків на західні кордони.

У 2022–2024 роках відбулися масштабні руйнування об'єктів транспортної мережі — пошкоджено тисячі кілометрів доріг, сотні мостів, залізничних станцій, аеропортів. Водночас, попри воєнні умови, Україна змогла частково стабілізувати перевезення та навіть досягти відновлювальної динаміки завдяки розвитку альтернативних логістичних маршрутів, інвестиціям ЄС, ЄІВ та участі в оновленій політиці TEN-T.

Інтенсивний розвиток транскордонних переходів із Польщею, Словаччиною, Угорщиною та Румунією, створення нових терміналів, розширення пропускної спроможності та впровадження програм «коридорів солідарності» підсилюють євроінтеграційний напрям логістичної політики України. У цих умовах оцінка стану, тенденцій та перспектив розвитку транзитної інфраструктури потребує науково обґрунтованого статистичного аналізу, який дозволяє виявити ключові диспропорції, масштаби втрат та нові можливості для системного розвитку.

Таким чином, дослідження статистичних параметрів розвитку транзитної інфраструктури України в період євроінтеграції та війни є актуальним для визначення ступеня відновлення транспортних мереж, виявлення критичних точок та обґрунтування пріоритетів подальшої політики модернізації та інтеграції з європейською логістичною системою.

Метою статті є здійснення комплексного статистичного аналізу розвитку транзитної інфраструктури України в умовах євроінтеграційних процесів та повномасштабної війни, а також оцінка змін вантажопотоків, пропускної спроможності та структурних трансформацій транспортної системи з 2021 по 2025 роки.

Виклад основного матеріалу. Повномасштабне російське вторгнення в Україну у лютому 2022 року спричинило безпрецедентні зміни в системі логістики та транспортних маршрутах країни. Блокада морських портів, руйнування інфраструктури та необхідність переорієнтації торгових потоків кардинально трансформували традиційні ланцюги постачання. За даними Світового банку, станом на кінець 2024 року прямі збитки інфраструктури України досягли 176 мільярдів доларів. У статті проаналізовано ключові показники логістичного сектору України до та після початку повномасштабної війни, базуючись на офіційних даних міжнародних організацій та аналітичних звітів.

Польща та Румунія стали ключовими транзитними напрямками для українського експорту. Протягом п'яти місяців 2024 року через залізничні прикордонні переходи з цими країнами Україна експортувала понад 15 мільйонів тонн вантажів [1]. Український бізнес побудував сотні термінальних комплексів, які працюють як на широкій, так і на європейській колії. «Укрзалізниця» дозволила понад 30 приватним компаніям розвивати прикордонні перевантажувальні комплекси [1].

У квітні 2025 року Європейський інвестиційний банк (ЄІБ) оголосив про підписання угоди на 50 мільйонів євро з українською державною залізничною компанією для модернізації ключових залізничних прикордонних переходів з Польщею, Словаччиною, Угорщиною та Румунією. Це сприяє ініціативі Коридорів солідарності ЄС-Україна для посилення транскордонного зв'язку та торгівлі [2].

У 2024 році український уряд прийняв Національну транспортну стратегію України до 2030 року та Стратегію розвитку та будівництва прикордонної інфраструктури з ЄС та Молдовою до 2030 року. Ці документи мають на меті трансформувати національну та міжнародну транспортну мережу країни [2].

Перегляд Регламенту щодо Транс-Європейської транспортної мережі (TEN-T) у 2024 році включив Україну та Молдову до європейських мереж TEN-T, виключивши при цьому Росію та Білорусь [2]. Чотири коридори TEN-T охоплюватимуть Україну (Північне море – Балтійське, Рейн – Дунай, Середземноморський та Балтійське море – Чорне море – Егейське море), включаючи порт Одеси [2]. Вздовж цих коридорів Україна зможе отримувати доступ до фондів Connecting Europe Facility (CEF) для фінансування розвитку інфраструктури [2].

Війна мала катастрофічний вплив на економіку України. За офіційними даними, валовий внутрішній продукт країни впав на 29% у 2022 році [3]. Транспортний сектор зазнав одних з найбільших втрат серед усіх галузей економіки. Станом на червень 2022 року прямі збитки транспортної мережі України становили понад 29,9 мільярда доларів, а економічні втрати від порушення транспортного сполучення досягли додаткових 26,1 мільярда доларів [4]. За оцінками експертів, понад 2100 сіл, 51 місто та 35 великих міст в районах, які повернулися під контроль уряду України, відчують порушення транспортних мереж через війну [4].

Фізичні руйнування інфраструктури були масштабними. Згідно з аналітичними даними, було пошкоджено 305 мостів, 19 аеропортів, 57 залізничних станцій та 24000 кілометрів доріг [5]. За оцінкою другої Швидкої оцінки збитків та потреб (RDNA2), проведеної в березні 2023 року, загальна вартість відновлення та реконструкції становила 411 мільярдів доларів, при цьому транспортний сектор потребував 22% від загальних потреб відновлення [6], в таблиці 1 наведені економічні наслідки війни. Станом на кінець 2024 року, за даними четвертої оцінки (RDNA4), потреби транспортного сектору на відновлення зросли до майже 78 мільярдів доларів [7, 8].

Таблиця 1 – Економічні наслідки війни для України
Table 1 – Economic consequences of the war for Ukraine

Показник	Період	Значення
Падіння ВВП	2022	-29%
Прямі збитки транспорту	Станом на 01.06.2022	29,9 млрд дол. США
Економічні втрати транспорту	Станом на 01.06.2022	26,1 млрд дол. США
Загальна вартість відновлення	Березень 2023	411 млрд дол. США
Загальні прямі збитки	Станом на 31.12.2024	176 млрд дол. США
Потреби відновлення транспорту	Станом на 31.12.2024	Приблизно 78 млрд дол. США
Пошкоджено мостів	Станом на 2023	305
Пошкоджено аеропортів	Станом на 2023	19
Пошкоджено залізничних станцій	Станом на 2023	57
Пошкоджено доріг	Станом на 2023	24000 км

Війна призвела до катастрофічного падіння обсягів вантажоперевезень в Україні. У 2021 році залізницями України було перевезено 314,3 мільйона тонн вантажів [9], морськими портами оброблено 157,3 мільйона тонн [10], автомобільним транспортом - близько 224 млн тонн. У 2022 році загальний обсяг вантажоперевезень усіма видами транспорту в Україні скоротився на 49,8% порівняно з 2021 роком і становив 317,2 мільйона тонн [11]. Це означає, що за рік країна втратила майже половину своєї транспортної потужності.

Залізничний транспорт зазнав особливо сильного удару. Укрзалізниця скоротила вантажні перевезення на 52,1% у 2022 році до 150,6 мільйонів тонн порівняно з довоєнним рівнем [12]. Автомобільний транспорт показав менше падіння - обсяги знизилися на 22% до 175 мільйонів тонн. Авіаційний транспорт практично припинив роботу, скоротившись на 85% до 15 мільйонів тонн [11].

Проте вже в 2023 році почалося поступове відновлення. За даними Державної служби статистики, у 2023 році обсяг вантажоперевезень виріс приблизно на 15% порівняно з 2022 роком. У 2024 році відновлення прискорилося: Укрзалізниця перевезла рекордні 174,9 мільйона тонн вантажів, що на 17,9% більше порівняно з 2023 роком, в таблиці 2 наведена динаміка вантажоперевезень в Україні. Загальний обсяг вантажоперевезень усіма видами транспорту, за оцінками, досяг приблизно 420 мільйонів тонн. Незважаючи на позитивну динаміку, обсяги перевезень залишалися нижчими за довоєнний рівень, але тенденція до відновлення була очевидною [10].

Таблиця 2 – Динаміка вантажоперевезень в Україні, млн т
Table 2 – Dynamics of freight transportation in Ukraine, million tons

Вид транспорту	2021	2022	2023	2024	Порівняння 2022-2021	Порівняння 2024-2021
Залізничний	314,3	150,6	148,4	174,9	-52.1%	-44.4%
Автомобільний	224	175	200	210	-22%	-6.3%
Морський	157,3	59	62	97,2	-62.5%	-38.2%
Річковий	~15	~15	~29	~17	0%	13.3%
Авіаційний	~5	~2	~2	~2	-60%	-60%
Всього	~630	317,2	~365	~420	-49.8%	-33.3%

Примітка: дані за 2023-2024 роки для автомобільного транспорту є розрахунковими на основі загальних тенденцій відновлення сектору [3]

Залізничний транспорт зазнав другої за величиною втрат серед усіх видів транспорту після морського. У 2023 році обсяг залишався практично незмінним і становив 148,4 мільйона тонн (-1,5% до 2022). Перевезення залізної та марганцевої руди зменшилися з 102 мільйонів тонн у 2021 до 31,7 мільйонів тонн у 2022 (-68,9%), а потім до 27,5 мільйонів тонн у 2023 році (-13,2% до 2022) [12]. Обсяги транспортування чорних металів скоротилися з 21,8 мільйонів тонн у 2021 до 9,2 мільйонів тонн у 2022 (-57,8%), а потім до 8,2 мільйонів тонн у 2023 році (-10,6% до 2022). Транспортування зерна було відносно стабільним: 33,7 мільйонів тонн у 2021, 32,5 мільйонів тонн у 2022 (-3,6%), та 30,6 мільйонів тонн у 2023 році (-5,9% до 2022), динаміка залізничних перевезень наведена в таблиці 3 [13].

Таблиця 3 – Динаміка залізничних перевезень в Україні, млн т
Table 3 – Dynamics of railway transportation in Ukraine, million tons

Показник	2021	2022	2023	2024	Порівняння 2022-2021	Порівняння 2024-2021
Загальні вантажі	314,3	150,6	148,4	174,9	-52.1%	-44.4%
Експорт	120	49,4	56	84,7	-58.8%	-29.4%
Імпорт	8	7	6,8	9,6	-12.5%	20%
Внутрішні	186,3	76,1	84,8	80,2	-59.1%	-56.9%
Зерно	33,7	32,5	30,6	34,1	-3.6%	1.2%
Руда (залізо +марганець)	102	31,7	27,5	33	-68.9%	-67.6%
Чорні метали	21,8	9,2	8,2	5,2	-57.8%	-76.1%

Джерела: [9] Statista 2021, [12] GMK 2022, [13] Кабінет Міністрів/GMK 2023, [10] GMK 2024

Внутрішні перевезення зросли найбільш значуще у 2023 році порівняно з 2022 роком – на 11,4% до 84,8 мільйонів тонн. За березень-грудень 2023 року Укрзалізниця збільшила загальний обсяг перевезень з 102 мільйонів тонн у 2022 до 126 мільйонів тонн у 2023 році [13].

Проте вже в 2024 році відбулося значне відновлення. Укрзалізниця збільшила загальний обсяг вантажоперевезень на 17,9% порівняно з 2023 роком, досягнувши 174,9 мільйона тонн [2,10]. Головним драйвером зростання стало збільшення експорту завдяки відкриттю морського коридору в серпні 2023 року. Обсяг експортних перевезень Укрзалізниці зріс на 51,2% порівняно з попереднім роком, або на 28,7 мільйона тонн, до 84,7 мільйона тонн. Частка експорту в загальному обсязі вантажоперевезень зросла до 48% (у 2023 році – 38%). Водночас внутрішні перевезення у 2024 році зменшилися на 5,5% до 80,2 мільйона тонн, а імпорتنє вантажоперевезення зросло на 40,9% до 9,6 мільйона тонн [10].

У структурі експортних вантажоперевезень перші три позиції займали зернові вантажі (40% або 34,1 млн тонн), залізна та марганцева руда (39% або 33 млн тонн) і чорні метали (6% або 5,2 млн тонн) [10]. Залізниці почали транспортувати дві третини від довоєнного рівня вантажів, що свідчить про поступове відновлення цього сектору.

Окремої уваги заслуговують контейнерні перевезення, які демонструють динамічне відновлення. У 2021 році Укрзалізниця перевезла 279,8 тисяч TEU контейнерів. У 2022 році після початку повномасштабної війни обсяг впав на 46% до 150,1 тисяч TEU. У 2023 році почалося відновлення – обсяг зріс на 34% до 201,3 тисяч TEU, при цьому 62% цього обсягу становив експорт, а 19% – імпорт та внутрішні перевезення [14].

У 2024 році Укрзалізниця збільшила інтермодальні контейнерні перевезення на 28% порівняно з 2023 роком до 258,18 тисяч TEU [15]. Обсяг вантажоперевезень у контейнерах майже наблизився до довоєнного рівня, досягнувши 92,3% від показника 2021 року.

Основна номенклатура вантажів у 2024 році розподілилася наступним чином: зернові вантажі – 46% або 101,8 тисяч TEU (+17,9% порівняно з 2023), чорні метали – 20% або 43,04 тисяч TEU (+42,3%). Імпорتنє вантажоперевезення становило 55,59 тисяч TEU, експорт – 162,72 тисяч, внутрішній трафік – 38,68 тисяч, та транзит – 1,19 тисяч [15].

Проте в першому півріччі 2025 року спостерігається зниження: Укрзалізниця скоротила обсяг контейнерних вантажоперевезень на 18% порівняно з аналогічним періодом 2024 року до 151,89 тисяч TEU. У структурі перевезень лідирує зерно (26% або 40,02 тисяч TEU), а чорні метали займають 21% (32,28 тисяч TEU), динаміка наведена в таблиці 4 [16].

Морські порти також демонструють позитивну динаміку в контейнерних перевезеннях. За січень-серпень 2025 року українські порти обробили 134,19 тисяч TEU, що на 3,3% більше порівняно з аналогічним періодом 2024 року. Це найвищий показник контейнерних перевезень з початку повномасштабної війни. У структурі відвантажень: експорт – 66,89 тисяч TEU, імпорт – 63,04 тисяч TEU, транзит – 4,26 тисяч TEU [16].

Таблиця 4 – Динаміка контейнерних перевезень (залізниця)

Table 4 – Container traffic dynamics (rail)

Показник	2023	2024	2025 (8 місяців)	Порівняння 2024-2023
Залізниця (тис. TEU)	201,3	258,18	151,89	-7.7%
Зернові вантажі (тис. TEU)	86,3	101,8	40,02	
Чорні метали (тис. TEU)	30,2	43,04	32,28	
Експорт (% від загального)	62%	63%	66%	
Імпорт + внутрішні (%)	38%	37%	34%	

Примітка: детальна структура по номенклатурі доступна тільки з 2023 року [15, 16]

Польські залізниці стали «воротами у світ» для українських експортерів після початку війни. У 2021 році через залізничні прикордонні переходи між Україною та Польщею було транспортовано 12,4 мільйона тонн вантажів. У 2022 році цей показник зріс на 36,7% до 16,9 мільйонів тонн. За перші сім місяців 2024 року обсяг перевезених вантажів досяг 12,743 мільйона тонн, що на 32% більше порівняно з аналогічним періодом 2023 року. Додатково, за перші 10 місяців 2024 року кількість поїздів, що перетинають польсько-український кордон, зросла на 20% порівняно з аналогічним періодом 2023 року [17].

Найбільший обсяг вантажів перевозився через прикордонний перехід Ізов-Грубешів, де за перші сім місяців 2024 року було транспортовано 6,954 мільйона тонн, що на 24% більше порівняно з аналогічним періодом 2023 року. Вантажопотік через перехід Мостиська-2-Медика збільшився на 21% до 3,051 мільйона тонн, а перехід Ягодин-Дорогуськ показав найбільше зростання - 71%, досягнувши 2,406 мільйона тонн [17].

Між Україною та Польщею функціонує шість залізничних прикордонних переходів, але лише чотири є операційними, при цьому їхнє завантаження становить лише 40-60% від потужності [1]. Це свідчить про наявність резервів для нарощування обсягів, хоча існують численні перешкоди. Зокрема, понад 10 польських перевізників працюють на контрольних пунктах Ягодин-Дорогуськ та Мостиська-2-Медика, що створює проблеми з пріоритизацією доступу до інфраструктури [1]. Серйозною перешкодою є брак зернових вагонів, платформ та локомотивів європейської колії, а також недостатні перевантажувальні потужності на кордоні [1]. Ситуація ускладнюється дублюванням контрольних процедур польськими та українськими органами, а також відсутністю попереднього планування вантажних перевезень через залізничні прикордонні переходи, в таблиці 5 наведена детальна статистика за основними переходами (січень-липень 2024) [1].

Таблиця 5 – Детальна статистика за основними переходами (січень-липень 2024)

Table 5 – Detailed statistics on major transitions (January-July 2024)

Прикордонний перехід	Обсяг (млн т)	Зміна до 2023 (7 міс.)
Ізов-Грубешів	6.954	24%
Мостиська II-Медика	3.051	21%
Ягодин-Дорогуськ	2.406	71%
Інші переходи	0.332	-
Всього (7 міс.)	12.743	32%

У 2024 році загальний обсяг вантажів, перевезених через морські прикордонні переходи, становив 97,9 мільйона тонн (+28,2% порівняно з 2023), тоді як через сухопутні прикордонні переходи було перевезено 64,3 мільйона тонн (-8,1%) [10]. Ці дані свідчать про переорієнтацію частини вантажів, які раніше експортувалися сухопутними шляхами, на морський коридор [10].

Станом на квітень 2025 року, за оцінками Європейської Комісії на основі даних Української митниці, близько 70% українського імпорту транспортувалося через Коридори солідарності, порівняно з приблизно 30% через Чорне море [2]. Це підкреслює важливість наземних маршрутів для імпорту, тоді як експорт переважно йде морським шляхом.

Логістичні потоки в ЄС та Україні кардинально змінилися через збільшення частки автомобільних перевезень. Якщо у 2021 році 74% проїздів через прикордонні пункти України здійснювалося автомобільним транспортом, то у 2023 році цей показник досяг майже 85%. Українські компанії збільшили використання автотранспорту як відповідь на логістичні обмеження: блокаду морських портів та обмежену пропускну спроможність залізничних переходів [1]. Експерти відзначають найвищу динаміку розвитку автомобільного транспорту серед усіх видів.

У червні 2022 року ЄС та Україна досягли угоди щодо вантажоперевезень автомобільним транспортом, яка скасувала необхідність для українських перевізників отримувати відповідні дозволи для перевезень до країн ЄС. Ця угода дозволила уникнути зупинки експорту української продукції [1].

Автомобільні прикордонні переходи з Польщею дозволили Україні задовольнити гуманітарні та військові потреби. Українські вантажівки збільшили кількість перетинів кордону на 34% у 2022 році та на 20% у 2023 році. Польща стала ключовим транзитним пунктом для доставки вантажів до більшості країн Північної та Західної Європи, при цьому перевезення палива, гуманітарних та військових вантажів становлять близько 20% від загального транспортного трафіку [1]. Динаміка змін обсягів і структури автомобільних перевезень на українсько-польському кордоні у 2021–2024 рр. наведена в таблиці 6, що підтверджує зростання ролі автомобільного транспорту в умовах воєнного стану.

Таблиця 6 – Динаміка змін обсягів і структури автомобільних перевезень на українсько-польському кордоні у 2021–2024 рр.

Table 6 – Dynamics of changes in the volume and structure of road transportation on the Ukrainian-Polish border in 2021–2024.

Показник	2021	2022	2023	2024	Порівняння 2024-2021
Частка авто у прикордонних переходах, %	74%	~80%	85%	~87%	+13 %
Зростання перетинів кордону (Польща), %	Базовий рік	+34%	+20%	+15%	+87% (накопичено)
Обсяг автоперевезень в Україні, млн т	224	175	200	210	-6.3%

Примітка: дані за 2023-2024 роки для обсягу автоперевезень є оціночними на основі загальних тенденцій зростання сектору [3]

Блокада польського кордону, розпочата в листопаді 2023 року, стала першим випадком такого переривання ланцюгів постачання, спричиненого політичними іграми [1]. Блокада тривала до кінця квітня 2024 року та призвела до серйозних економічних втрат. Прямі наслідки включали збільшення логістичних витрат та цін, а також подовження термінів доставки. Тарифи на доставку сталевих виробів з Європи зросли в 3-4 рази, що додало 10-15% до ціни імпортованої сталі [1]. Вантажівки в середньому стояли на кордоні 12-14 днів, що унеможливило доставку продукції з ЄС за 2-3 дні [1].

Під час війни українські експортери були змушені перенаправляти вантажопотоки до портів ЄС, зокрема в Румунії (Констанца), Болгарії (Бургас), Польщі (Гдиня, Гданськ, Щецин, Свиноуйсьце), Хорватії (Рієка, Плоче) та Німеччині (Гамбург, Бремергафен, Бремен) [1]. Внаслідок цього середня відстань до порту відправлення для українських експортерів зросла в п'ять разів, а витрати на доставку до порту призначення підвищилися в середньому в 3-4 рази [1].

Констанца (Румунія) стала одним з головних портів для українського експорту після початку війни [1]. Українські товари надходять до Констанци автомобільним, залізничним транспортом та баржами з українських дунайських портів Рені та Ізмаїл [1].

Війна в Україні, поряд з пандемією COVID-19, вплинула на глобальні витрати на морські перевезення [19]. Порушення логістики та портових операцій, руйнування інфраструктури та торговельні обмеження підвищили витрати на морське страхування та ціни на паливо [18]. За даними Конференції ООН з торгівлі та розвитку (UNCTAD), ціни на судно-паливо VLSFO (дуже низький вміст сірки) зросли на 64% з січня по травень 2022 року [19]. Збільшилися відстані доставки, час транзиту та, відповідно, загальні витрати [18].

Ціни на паливо підвищилися по всьому світу, що викликало занепокоєння Європарламенту [18]. За даними UNCTAD, війна перешкоджає торгівлі та морській логістиці, особливо в регіоні Чорного

моря, що призводить до більшого глобального попиту на судна та підвищення вартості морських перевезень у всьому світі [18, 19]. Тарифи на морські перевезення сухих насипних вантажів зросли на 60% між лютим та травнем 2022 року, що вказано в таблиці 7 [20].

Світові ціни на сільськогосподарську продукцію різко зросли через порушення українського експорту. Ціни на зерно підвищилися на 60% між лютим та травнем 2022 року, що загрожувало продовольчою безпекою країн Африки та Близького Сходу, які традиційно залежали від українських поставок.

Таблиця 7 – Вплив війни на глобальні ціни

Table 7 – The impact of war on global prices

Показник	Період	Зростання
Ціни на зерно	Лютий-травень 2022	60%
Ціни на судно-паливо VLSFO	Січень-травень 2022	64%
Тарифи на сухі насипні вантажі	Лютий-травень 2022	60%

Незважаючи на наявні транспортні варіанти, вільна навігація через українські порти Чорного моря залишається основою економічної стабільності в Україні та ЄС. Європейська логістична інфраструктура не може обробити весь український експорт через кілька причин. По-перше, невеликий розмір морських портів ЄС не дозволяє прийняти весь обсяг українських вантажів. По-друге, різна ширина колії залізничних систем в Україні та ЄС створює додаткові перешкоди для транспортування. По-третє, спостерігається дефіцит вагонів та локомотивів у ЄС. Нарешті, існує нестача перевантажувальних потужностей на прикордонних переходах [1].

Організація європейських морських портів підкреслила, що порти Європи є критично важливими для підтримки операційності ланцюгів постачання та створення нових альтернативних маршрутів для українського експорту. Порти відіграють ключову роль у забезпеченні енергопостачання та зниженні енергетичної залежності від Росії [18].

Українські експортери намагалися відправляти вантажі через польські порти, але зіткнулися з кількома проблемами. Насамперед, польські порти надають пріоритет власному вантажу, що обмежує доступ для української продукції. Крім того, спостерігається брак портової потужності для перевантаження українського експорту та відсутність складських площ для накопичення партій відправлення. Загалом потужності польських портів повністю використовуються, тому немає місця для обробки додаткового українського експорту, таблиця 8 [1].

Таблиця 8 – Використання залізничних потужностей Україна-Польща

Table 8 – Use of railway capacities Ukraine-Poland

Показник	Значення
Кількість залізничних переходів	6 (4 операційні)
Рівень використання потужності	40-60%
Резерв потужності	40-60%

Українські компанії продемонстрували значну адаптивність до умов війни [1]. Вони перенаправили вантажі до портів інших країн та диверсифікували маршрути постачання, провели реструктуризацію систем постачання палива та збільшили використання автомобільного транспорту. Дунайські порти наростили перевантаження вантажів, а менеджери з управління ланцюгами постачання постійно моніторять нові можливості на вантажному ринку та використовують кожну можливість для відправлення вантажів будь-яким доступним способом [1]. Ключовим елементом адаптації стало використання інтермодальних перевезень та комбінації різних видів транспорту для досягнення оптимальних маршрутів.

Закриття українських портів спричинило серйозні порушення в європейських та інших ланцюгах постачання, а через відсутність морської логістики та зв'язку загрожувала міжнародна продовольча криза [18]. Особливо це стосувалося країн Африки та Близького Сходу, які традиційно залежали від українського зерна. До війни Україна експортувала більше 90% своєї сільськогосподарської продукції, що становило близько третини від загального обсягу експорту до Європи, Китаю та Африки [18].

Підвищення цін на зерно на 60% між лютим та травнем 2022 року створило загрозу продовольчій безпеці мільйонів людей у країнах, що розвиваються. Міжнародна морська організація закликала до створення безпечних морських коридорів, а Міжнародний транспортний форум зробив заклик до дій щодо розблокування торгових маршрутів та морських портів у Чорному морі [18].

ЄС запровадив план коридорів солідарності як альтернативних логістичних маршрутів автомобільним, залізничним та водним транспортом для експорту сільськогосподарських товарів з України [19]. Мета плану – розблокувати 20 мільйонів тонн продовольства в Одесі та перенаправити 3 мільйони тонн зерна на місяць через нові модальні маршрути, такі як Дунай, Констанца (Румунія) та порти Польщі, Балтійського та Адріатичного морів [18]. За даними Європейської Комісії, до червня 2022 року було експортовано близько 6 мільйонів тонн [18].

У червні 2022 року на зустрічі Європейської Ради Україна та Молдова, як країни Чорного моря, отримали статус кандидатів на вступ до ЄС [18]. ЄС також підписав угоду про вантажні перевезення з Україною та Молдовою для переміщення вантажів з моря на автомобільний транспорт, що мало підтримати експортні потоки та дозволити Україні імпортувати необхідні товари [18].

Санкції ЄС проти Росії призвели до глобальної перебудови ланцюгів постачання нафти, газу та вугілля. ЄС заборонив морський імпорт російської сирої нафти 5 грудня 2022 року. Китай та Індія стали основними споживачами російської нафти: з 5 грудня 2022 року до кінця квітня 2024 року вони купили відповідно 48% та 35% російського експорту сирої нафти. Водночас США замінили Росію як головного постачальника нафти до Європи. ЄС також збільшив імпорт нафти з Саудівської Аравії, Норвегії, Бразилії, Іраку та Анголи.

Після запровадження заборони на імпорт російських нафтопродуктів 5 лютого 2023 року, Туреччина стала найбільшим покупцем російських нафтопродуктів, придбавши 24% експорту Росії з лютого 2023 по квітень 2024 року. Водночас Індія стала основним постачальником нафтопродуктів до ЄС: у 2023 році імпорт ЄС очищених нафтопродуктів з Індії зріс на 115% порівняно з попереднім роком.

ЄС заборонив імпорт російського вугілля 8 квітня 2022 року, внаслідок чого США стали найважливішим постачальником вугілля до ЄС (27% імпорту минулого року), тоді як Китай став найбільшим споживачем російського вугілля (45% всього експорту вугілля з Росії).

Висновки. Війна створила численні виклики для української логістики: блокаду морських портів, нестачу вантажного транспорту, включаючи вантажівки та залізничні вагони, дефіцит водіїв та палива, переповнені склади, збільшені терміни доставки, підвищені логістичні витрати та перебої в енергопостачанні. Економіка України зазнала катастрофічних втрат: ВВП впав на 29% у 2022 році, загальні прямі збитки інфраструктури досягли 176 мільярдів доларів, а транспортний сектор потребує майже 78 мільярдів доларів на відновлення.

Загалом обсяг вантажоперевезень скоротився на 49,8% у 2022 році до 317,2 мільйонів тонн, при цьому залізничний транспорт постраждав найбільше зі зниженням на 52,1%. Морський експорт, який до війни забезпечував 90% експорту сільськогосподарської продукції, був практично повністю паралізований у перші місяці конфлікту.

Проте українські компанії продемонстрували високий рівень стійкості та інноваційності. Через тимчасовий коридор у 2023-2024 роках експортовано 93,3 мільйона тонн вантажів за весь період його роботи, а в 2024 році морський коридор забезпечив експорт 76,4 мільйона тонн. Дунайські порти показали шестикратне збільшення обсягів - з 5 мільйонів тонн у 2021 році до піку в 29 мільйонів тонн у 2023 році, хоча в 2024 році після відкриття морського коридору обсяг скоротився до 17,3 мільйона

тонн. Залізничне сполучення з Польщею зросло на 36,7% у 2022 році та додаткові 28% у першому кварталі 2024 року. Частка автомобільного транспорту збільшилася з 74% до 85% від загальної кількості прикордонних переходів.

Вже в 2023 році почалося поступове відновлення: обсяг вантажоперевезень зріс на 22% порівняно з 2022 роком. У 2024 році відновлення прискорилося: Укрзалізниця збільшила перевезення на 17,9% до 174,9 мільйона тонн, морські порти підвищили обробку вантажів на 57% до 97,2 мільйона тонн, а контейнерні перевезення наблизилися до довоєнного рівня (+28% до 258,18 тисяч TEU). Залізниці транспортують дві третини від довоєнного рівня вантажів, а автомобільний транспорт демонструє найвищу динаміку розвитку.

У 2025 році тенденція до відновлення триває, хоча й нерівномірно: порти за перший квартал обробили 23 мільйони тонн, а за січень-серпень контейнерні перевезення в портах показали рекордне зростання (+3,3% до 134,19 тисяч TEU).

Однак залишаються значні структурні обмеження. Європейська логістична інфраструктура не здатна повністю замінити українські чорноморські порти через різницю в колії, недостатні перевантажувальні потужності та обмежені можливості європейських портів. Витрати на логістику зросли в 3-5 разів, а відстані доставки збільшилися в п'ять разів. Глобальні наслідки включали зростання цін на зерно на 60%, підвищення вартості судно-палива на 64% та загрозу продовольчій безпеці мільйонів людей.

Пріоритетом для українських компаній залишається впровадження європейських регуляцій для прискорення процедур та інтеграція до ланцюгів постачання ЄС. Вільна навігація через українські порти Чорного моря продовжує бути критично важливою для економічної стабільності як України, так і Європейського Союзу. Міжнародне співробітництво та подальша адаптація логістичних систем залишаються ключовими факторами для відновлення української економіки та забезпечення глобальної продовольчої безпеки.

Перелік посилань

1. GMK Center. How the Russia-Ukraine war has impacted on logistics routes and supply chains. 2024. URL: <https://gmk.center/en/posts/how-the-russia-ukraine-war-has-impacted-on-logistics-routes-and-supply-chains/> (дата звернення 1.12.2025)
2. ISPI. Rebuilding Connections: Ukraine's Transport Infrastructure and the Road to EU Integration. 2025. URL: <https://www.ispionline.it/en/publication/> (дата звернення 10.12.2025)
3. Statista/World Bank. GDP decline in Ukraine 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/> (дата звернення 1.12.2025)
4. World Bank. Transport sector damage assessment June 2022. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2022/09/09/> (дата звернення 1.12.2025)
5. CSIS. Infrastructure damage statistics. URL: <https://www.csis.org/> (дата звернення 12.12.2025)
6. World Bank. Second Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA2). 2023. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/03/23/> (дата звернення 1.12.2025)
7. UNDP. Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4). 2024. URL: <https://www.undp.org/ukraine> (дата звернення 1.12.2025)
8. World Bank. Fourth Rapid Damage and Needs Assessment. 2025. URL: <https://www.worldbank.org/en/country/ukraine> (дата звернення 1.12.2025)
9. Statista. Ukraine railway freight volumes 2021. URL: <https://www.statista.com/statistics/> (дата звернення 10.12.2025)
10. GMK Center. Cargo transshipment in Ukrainian ports in 2024 increased by 57%. URL: <https://gmk.center/en/infographic/cargo-transshipment-in-ukrainian-ports-in-2024-increased-by-57-at-once/> (дата звернення 10.12.2025)
11. GMK Center. Cargo transportation volumes decline 2022. URL: <https://gmk.center/en/posts/> (дата звернення 12.12.2025)
12. GMK Center. Ukrzaliznytsia freight volumes 2022. URL: <https://gmk.center/en/posts/> (дата звернення 10.12.2025)

13. GMK Center. Ukrzaliznytsia transported 148.4 million tonnes of cargo in 2023. URL: <https://gmk.center/en/infographic/ukrainian-railways-increased-export-shipments-in-2024-by-51/> (дата звернення 10.12.2025)
14. GMK Center. Ukrainian Railways increased intermodal transportation by 34% in 2023. URL: <https://gmk.center/en/news/ukrainian-railways-increased-intermodal-transportation-by-34-y-y-in-2023/> (дата звернення 10.12.2025)
15. GMK Center. Ukrainian Railways increased container transportation by 28% in 2024. URL: <https://gmk.center/en/news/ukrainian-railways-increased-container-transportation-by-28-y-y-in-2024/> (дата звернення 10.12.2025)
16. GMK Center. Ukrainian seaports set a record for container throughput in 2025. URL: <https://gmk.center/en/news/infrastructure/> (дата звернення 5.12.2025)
17. Railway Supply. Increase in Freight Flow Through Ukrainian-Polish Border Crossings by 32%. 2024. URL: <https://www.railway.supply/en/> (дата звернення 10.12.2025)
18. European Parliament Research Service. Russia's war on Ukraine: Maritime logistics and connectivity. 2022. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2022/733603/EPRS_ATAG\(2022\)733603_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2022/733603/EPRS_ATAG(2022)733603_EN.pdf) (дата звернення 1.12.2025)
19. UNCTAD. Impact of the war in Ukraine on trade and development. 2022. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/osinginf2022d2_en.pdf (дата звернення 1.12.2025)

STATISTICAL ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF UKRAINE'S TRANSIT INFRASTRUCTURE IN THE CONDITIONS OF EUROPEAN INTEGRATION AND WAR

Khobta Mykhailo O., Ph.D. Economics, Associate Professor of Department of Management, National Transport University, e-mail: m.khobta@ntu.edu.ua, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovich-Pavlenko str., 1. <https://orcid.org/0000-0002-6505-9092>

Sukmaniuk Victoria M., Assistant of Department of Management, National Transport University, e-mail: v.sukmaniuk@ntu.edu.ua, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovich-Pavlenko str., 1. <https://orcid.org/0000-0003-4202-8960>

Tretiak Dmytro S., Graduate of the first (bachelor) level of higher education, specialty 073 «Management» of the Department of Logistics and Project Management, National Transport University, Kyiv, e-mail: dmittii1995tret@gmail.com Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovich-Pavlenko str., 1.

Summary. The article is devoted to a comprehensive analysis of the Ukrainian transport and logistics system in the conditions of a full-scale war and deepening integration with the European Union. The article examines large-scale structural changes in transit flows, the dynamics of freight transportation by various modes of transport, as well as current trends in the development of border infrastructure. Particular attention is paid to the revision of European transport policy, the expansion of the TEN-T network with the participation of Ukraine, the attraction of EIB investment resources and the effectiveness of the Solidarity Corridors programs. Based on official statistical data, international reports and government documents, the scale of economic losses in the transport sector was examined, in particular the destruction of infrastructure facilities, the reduction in freight transportation volumes and the change in the structure of logistics flows in 2021–2024. A comparative analysis of the volumes of rail, road, sea, river and air transportation before and after 2022 was conducted, which made it possible to identify the key factors in the decline and subsequent recovery of the sector. The article shows that rail and sea transport suffered the greatest losses, however, due to the reorientation to the western direction, the intensification of cross-border transportation and the creation of new logistics routes, a gradual recovery of cargo flows is observed in 2023–2024. The positive dynamics of intermodal and container transportation are separately studied, which indicates the strengthening of Ukraine's role in European supply chains. It is concluded that the development of transit infrastructure, the modernization of border crossings, the inclusion of Ukraine in the updated TEN-T network and the expansion of cooperation with Poland, Romania, Slovakia and Hungary form a strategic basis for the long-term integration of Ukraine's transport system with the European market and ensure its increase in its role as a key transit center of Eastern Europe.

Keywords: transit infrastructure; statistical analysis; logistics; transport corridors; European integration; martial law; international cargo flows; transport system of Ukraine.

References

1. GMK Center. (2024). *How the Russia–Ukraine war has impacted on logistics routes and supply chains*. Retrieved December 1, 2025, from <https://gmk.center/en/posts/how-the-russia-ukraine-war-has-impacted-on-logistics-routes-and-supply-chains/>
2. ISPI. (2025). *Rebuilding connections: Ukraine's transport infrastructure and the road to EU integration*. Retrieved December 10, 2025, from <https://www.ispionline.it/en/publication/>
3. Statista & World Bank. (2022). *GDP decline in Ukraine in 2022*. Retrieved December 1, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/>
4. World Bank. (2022). *Transport sector damage assessment (June 2022)*. Retrieved December 1, 2025, from <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2022/09/09/>
5. Center for Strategic and International Studies (CSIS). (2023). *Infrastructure damage statistics*. Retrieved December 12, 2025, from <https://www.csis.org/>
6. World Bank. (2023). *Second rapid damage and needs assessment (RDNA2)*. Retrieved December 1, 2025, from <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/03/23/>
7. United Nations Development Programme (UNDP). (2024). *Rapid damage and needs assessment (RDNA4): Ukraine*. Retrieved December 1, 2025, from <https://www.undp.org/ukraine>
8. World Bank. (2025). *Fourth rapid damage and needs assessment: Ukraine*. Retrieved December 1, 2025, from <https://www.worldbank.org/en/country/ukraine>
9. Statista. (2021). *Ukraine railway freight volumes*. Retrieved December 10, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/>
10. GMK Center. (2024). *Cargo transshipment in Ukrainian ports in 2024 increased by 57%*. Retrieved December 10, 2025, from <https://gmk.center/en/infographic/cargo-transshipment-in-ukrainian-ports-in-2024-increased-by-57-at-once/>
11. GMK Center. (2022). *Cargo transportation volumes decline in Ukraine*. Retrieved December 12, 2025, from <https://gmk.center/en/posts/>
12. GMK Center. (2022). *Ukrzaliznytsia freight volumes*. Retrieved December 10, 2025, from <https://gmk.center/en/posts/>
13. GMK Center. (2023). *Ukrainian Railways transported 148.4 million tonnes of cargo*. Retrieved December 10, 2025, from <https://gmk.center/en/infographic/ukrainian-railways-increased-export-shipments-in-2024-by-51/>
14. GMK Center. (2023). *Ukrainian Railways increased intermodal transportation by 34%*. Retrieved December 10, 2025, from <https://gmk.center/en/news/ukrainian-railways-increased-intermodal-transportation-by-34-y-y-in-2023/>
15. GMK Center. (2024). *Ukrainian Railways increased container transportation by 28%*. Retrieved December 10, 2025, from <https://gmk.center/en/news/ukrainian-railways-increased-container-transportation-by-28-y-y-in-2024/>
16. GMK Center. (2025). *Ukrainian seaports set a record for container throughput*. Retrieved December 5, 2025, from <https://gmk.center/en/news/infrastructure/>
17. Railway Supply. (2024). *Increase in freight flow through Ukrainian–Polish border crossings by 32%*. Retrieved December 10, 2025, from <https://www.railway.supply/en/>
18. European Parliament Research Service. (2022). *Russia's war on Ukraine: Maritime logistics and connectivity*. Retrieved December 1, 2025, from [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2022/733603/EPRS_ATAG\(2022\)733603_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2022/733603/EPRS_ATAG(2022)733603_EN.pdf)
19. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2022). *Impact of the war in Ukraine on trade and development*. Retrieved December 1, 2025, from https://unctad.org/system/files/official-document/osginf2022d2_en.pdf

Дата надходження до редакції 05.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 27.01.2026.

УДК 658.8:656.13
UDC 658.8:656.13

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-444-458

**ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЛОГІСТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ
АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВІЗНИКІВ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ
В УМОВАХ МІСЬКОЇ АГЛОМЕРАЦІЇ**

**FACTORS OF FORMATION AND ASSESSMENT OF THE LOGISTICS POTENTIAL
OF ROAD CARRIERS OF CONCRETE MIXTURES IN URBAN AGGLOMERATION**



Цимбал Сергій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: tsymbal_s_v@ukr.net, тел. +380937602079

<https://orcid.org/0009-0005-1612-968X>



Макарова Тамара Володимирівна, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: tomamakarova@ukr.net, тел. +380731235169

<https://orcid.org/0000-0003-0669-8350>



Варчук Вячеслав Володимирович, асистент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: vvvarchuk@vntu.edu.ua, тел. +380678980719

<https://orcid.org/0009-0005-2622-9780>

Анотація. Досліджено теоретичні та прикладні аспекти формування логістичного потенціалу підприємств, що спеціалізуються на перевезенні бетонних сумішей у місті Вінниця. Авторами уточнено сутність поняття «логістичний потенціал» через призму часової детермінанти та фізико-хімічних властивостей вантажу. Запропоновано математичну модель оцінки логістичної потужності, яка враховує температурний коефіцієнт та специфіку міського трафіку (навантаження на мостові переходи). Обґрунтовано структуру логістичного потенціалу, що включає інфраструктурну, просторову, ресурсну, цифрову та кадрову компоненти. Доведено, що синергія цих елементів забезпечує ринкову адаптивність перевізника та підвищує економічну ефективність використання спеціалізованого рухомого складу на 15-20%.

Ключові слова. Логістичний потенціал, рідкий бетон, автомобіль-бетонозмішувач, місто Вінниця, температурний коефіцієнт, Smart-логістика, ринкова адаптивність, транспортна інфраструктура.

Вступ. Сучасний етап розвитку міських агломерацій в Україні, попри складні макроекономічні та безпекові виклики, демонструє високу затребуваність монолітно-каркасних технологій. Ключовою ланкою в цьому процесі є перевезення бетонних сумішей (рідкого бетону) - унікального «динамічного» вантажу, термін життєздатності якого характеризується коротким технологічним циклом [1].

Критична специфіка логістики рідкого бетону зумовлена обмеженням терміном збереження його рухливості - зазвичай він становить від 90 до 180 хвилин (залежно від марок та добавок). Після закінчення цього «вікна виживання» розпочинається незворотний процес гідратації цементу - бетон починає «тужавіти», перетворюючись із пластичної суміші на моноліт [2,3].

В цьому сенсі для спеціалізованих автомобільних перевізників у м. Вінниці проблема формування логістичного потенціалу набуває особливого значення: будь-який розрив у ланцюгу «виробництво - доставка - укладання» (наприклад, непередбачена зупинка автомобіля-бетонозмішувача через затори, технічну несправність чи повітряну тривогу) призводить не лише до втрати вартості вантажу, а й до ризику незворотного пошкодження дорогого спеціалізованого транспортного засобу. У цьому контексті для спеціалізованих автомобільних перевізників у м. Вінниця проблема формування логістичного потенціалу набуває особливого значення: будь-яке порушення безперервності ланцюга «виробництво – доставка – укладання» (наприклад, непередбачена зупинка автомобіля-бетонозмішувача через затори, технічну несправність або повітряну тривогу) призводить не лише до втрати вартості вантажу, але й до ризику незворотного пошкодження дорогого спеціалізованого транспортного засобу. Застигання бетону всередині барабана змішувача призводить до необхідності вартісного механічного очищення або повної заміни змішувальної установки, що робить фактор часу головним ворогом економічної стійкості перевізника.

Аналіз досліджень і публікацій. У сучасній літературі поняття «логістичний потенціал» є багатогранним. Проаналізовані погляди провідних дослідників крізь призму специфіки сучасних автомобільних перевезень рідкого бетону.

Крикавський Є.В., один із фундаторів української логістичної школи, у своїх працях розглядає логістичний потенціал як здатність підприємства генерувати високу споживчу цінність за мінімальних витрат [4]. Для вінницького перевізника бетону «споживча цінність» - це не просто доставка, а доставка в межах технологічного вікна (до початку «тужавіння»). Тобто за Крикавським Є.В., логістичний потенціал - це передусім часова ефективність.

Тридід О. М., Гриньова В. М. та Лазарева З. М. акцентують увагу на тому, що логістичний потенціал є сукупністю ресурсів (технічних, людських, інформаційних), які перебувають у взаємодії [5]. Для об'єктів у м. Вінниця це означає, що недостатньо мати нові автомобілі-бетонозмішувачі. Потрібен інформаційний зв'язок між диспетчером заводу та водієм, який стоїть у заторі (наприклад, на вулиці Київській), щоб вчасно скоригувати темп відвантаження.

Чухрай Н.І. пов'язує логістичний потенціал із інноваційністю та адаптивністю до змін [6]. У сучасних умовах функціонування підприємств у м. Вінниця це означає здатність адаптувати графік заливки під графіки відключень електропостачання або повітряних тривог у регіоні. Логістичний потенціал у цьому випадку визначається наявністю резервних стратегій, зокрема використанням хімічних добавок-сповільнювачів у разі затримки автомобіля через форс-мажорні обставини.

Шинкаренко В.Г., який детально досліджував потенціал саме автотранспортних підприємств, виділяє у його структурі виробничо-технічну базу [7]. Для автомобільного перевізника бетону - це не просто кількість рухомого складу, а наявність автомобільних бетононасосів з різною довжиною стріли (від 16 до 52 метрів). Саме комбінація «змішувач плюс насос» формує повний логістичний цикл, що критично для щільної забудови таких районів міста Вінниці, як «Поділля» чи «Вишенька».

Таким чином, більшість авторів розглядають логістичний потенціал як статичну сукупність ресурсів. В статті запропоновано розглядати логістичний потенціал як динамічну характеристику, ключовим критерієм оцінювання якої виступає коефіцієнт збереження якості вантажу під час транспортування в умовах міського трафіку.

Дотепер залишаються недостатньо вивченими чинники впливу інфраструктурних бар'єрів (стан мостових переходів, часові затори) та погодних умов на реальну пропускну здатність парку

спеціалізованих автомобілів. Відсутність інтегральних показників, які б поєднували технічні параметри рухомого складу з часовим лімітом «життя» бетону, стримує розвиток маркетингової стійкості перевізників.

Метою статті є теоретичне обґрунтування та розробка методичного підходу до оцінки логістичного потенціалу (сутність якого уточнена для автомобільних перевізників рідкого бетону) з урахуванням кон'юнктури будівельного ринку та інфраструктури м. Вінниці.

Викладення основного матеріалу. На відміну від класичних визначень логістичного потенціалу, який часто трактується як статична можливість перевезти певну кількість тонн вантажу, для автомобільного підприємства-перевізника рідкого бетону його пропонується визначати як динамічну спроможність. Логістичний потенціал перевізника рідкого бетону - це інтегральна здатність підприємства забезпечити безперервний цикл «виробництво - доставка - укладання» в умовах жорсткого часового ліміту (терміну зберігання рухливості суміші). При цьому, ключовими складовими логістичної системи є наступні:

- синхронізаційний ресурс: це не просто наявність рухомого складу, а здатність «підлаштувати» виїзд автомобілів з бетонного вузла під темп роботи бетононасоса на об'єкті у Вінниці. Якщо потенціал високий - автомобіль не чекає на об'єкті, і об'єкт не чекає на автомобіль;

- мобільність у часових «пробках»: для міста Вінниці (з її особливостями руху через мости) сутність потенціалу полягає у здатності диспетчерської служби миттєво змінювати маршрути доставки (наприклад, об'їзд через Старе місто, якщо на Центральному мосту «затор»);

- технологічна витривалість: здатність автомобілів-бетонозмішувачів підтримувати гомогенність суміші під час вимушених простоїв.

Беручи до уваги викладене, можна зробити висновок, що для звичайного перевізника логістичний потенціал переважно визначається співвідношенням вартості перевезення та відстані доставки, тоді як для перевізника бетонних сумішей його визначальними параметрами є збереження якості суміші та точність дотримання часу транспортування.

Обґрунтована вище сутність логістичного потенціалу як динамічної здатності зберігати якість суміші в часі потребує практичної проекції на реальні умови функціонування ринку. Адже потенціал підприємства-перевізника не існує у вакуумі - він реалізується у конкретному конкурентному середовищі, де взаємодіють виробничі потужності бетонних вузлів, пропускна здатність вулично-дорожньої мережі та мінливий попит забудовників. Чинники формування та показники для оцінювання логістичного потенціалу автомобільних перевезень бетонних сумішей у місті Вінниці наведені на рис. 1.

Для автомобільних перевізників рідкого бетону у м. Вінниця формування логістичного потенціалу є критичним питанням маркетингової стійкості: у місті, де географічна відстань між бетонним вузлом та об'єктом будівництва може бути незначною, вирішального значення набуває «часова дистанція», зумовлена специфікою міської інфраструктури. Саме тому для об'єктивної оцінки можливостей перевізника необхідно детально проаналізувати сучасну кон'юнктуру ринку бетонних сумішей та особливості логістичного простору міста Вінниці. Нижче проаналізована структура логістичного потенціалу.

1. Ринково-інфраструктурна компонента логістичного потенціалу характеризує відповідність між потребами регіонального ринку бетонних сумішей та можливостями транспортно-логістичної системи щодо їх своєчасного перевезення. Наведений аналіз кон'юнктури ринку бетонних сумішей (рідкого бетону) та інфраструктури спеціалізованих автомобільних перевезень у місті Вінниці.

Нормативно-правове поле (КВЕД). Для учасників ринку використовуємо такі коди [8]:

- виробники: 23.63 «Виробництво готових для використання бетонних сумішей» (основний для бетонних заводів);

- перевізники: 49.41 «Вантажний автомобільний транспорт» (спеціалізовані підприємства автомобільного транспорту);

- допоміжна діяльність: 52.29 «Інша допоміжна діяльність у сфері транспорту» (логістичні та експедиторські послуги).



Рисунок 1 – Чинники формування та показники для оцінювання логістичного потенціалу автомобільних перевезень бетонних сумішей у місті Вінниці

Figure 1 – Factors of formation and indicators for assessing the logistics potential of road transportation of concrete mixtures in the city of Vinnytsia

Ринковий простір бетонних сумішей. У м. Вінниці сформовано потужний кластер виробників, розташованих переважно в промислових зонах для зручного виїзду на транспортні магістралі:

- ТОВ «Бетон-Центр» (розташоване на території Стрижавського кар'єру): один із лідерів. Має повний цикл: від видобутку щебеню до доставки власним автопарком;
- ПБГ «Ковальська»: представлена маркою «Бетон від Ковальської». Має потужні вузли та високі стандарти якості (класи міцності від B7,5 до B60) [9];
- «Каскад-Бетон»: популярний виробник, орієнтований на широкий спектр марок (M100–M400);
- ТОВ «Вінбетон», «Бетон-Інвест», «Куб-Бетон»: локальні виробники, що забезпечують гнучкість поставок у межах міста;
- ТОВ «Віндор»: спеціалізується на виробництві бетону та наданні спецтехніки в оренду.

Отже, сучасний стан ринку будівельних матеріалів м. Вінниці демонструє високу концентрацію виробничих потужностей, що формує специфічний ландшафт для логістичних операцій. Аналіз дислокації основних виробників бетону дозволяє виділити три ключові вузли («Вінницький трикутник»), що формують логістичний простір міста:

- північний вузол (Стрижавський напрямок): тут домінує ТОВ «Бетон-Центр» та потужності, орієнтовані на північну частину міста (вул. Київська), індустріальні парки (в напрямку «Десни») та транзитні об'єкти через окружну дорогу («Вишенька», «9-й мікрорайон», с. Зарванці);
- східний вузол (Тяжилів - Немирівське шосе): ПБГ «Ковальська» та локальні виробники (наприклад, «Вінбетон»). Це стратегічна зона для промислового будівництва та нових житлових масивів;

- південно-західний вузол (Гніванське шосе - Електромережа): забезпечує потреби мікрорайонів «Поділля», «Академічний» та приватної забудови.

Така розосередженість заводів вимагає від автомобільного перевізника високої мобільності: логістичний потенціал підприємства визначається здатністю оперативно перекидати парк автомобілів-бетонозмішувачів між цими точками залежно від пікових навантажень на конкретних об'єктах.

Динаміка попиту та обсягів будівництва. За останні роки ринок бетону в Україні та м. Вінниці, зокрема, пережив значні коливання [10,11,12]:

- 2021 рік: пік виробництва (близько 25,8 млн. тонн по Україні) завдяки активному дорожньому будівництву та розвитку житлового сектору;

- 2022-2023 роки: спад через війну, проте з поступовим відновленням. Виробництво товарного бетону становило приблизно 7,32 млн. тонн по Україні. Ціна на бетон за цей період зросла на 50% (з ~1600 грн. до ~2500 грн. за кубічний метр);

- 2024-2025 роки: по Україні вироблено 8,2 млн. тонн товарного бетону. Обсяги будівельних робіт в Україні зросли на 23,5% у 2024 році.

Вінниця залишається активним майданчиком: населення міста на кінець 2025 року становить близько 430 тис. осіб, що підтримує попит на будівництво комфортного житла та торгово-офісних центрів. Попри виклики воєнного стану, Вінниця стабільно входить у ТОП-10 міст України за темпами введення житлових комплексів в експлуатацію [6]. Згідно з даними Головного управління статистики у Вінницькій області, обсяг виробленої будівельної продукції у 2024 році продемонстрував стійке зростання (понад 15% у порівнянні з попереднім періодом). Особливістю Вінниці є переважання монолітно-каркасного будівництва, що створює постійний попит на бетон високих марок (М300-М400). Це ставить перевізника у жорсткі рамки: термін «життя» такої суміші при транспортуванні влітку не перевищує 90 - 120 хвилин.

Ланцюг «Виробник - перевізник - споживач». Виробник за звичай концентрується на хімічному складі та темпах відвантаження. Перевізник (об'єкт дослідження) є критичною ланкою. Його потенціал - це «міст», який не дає замовленню перетворитися на збиток. Споживачі (забудовники «Вінницябуд», «Особняк» тощо та приватний сектор) вимагають точного графіку (ритмічності) для безперервної заливки фундаментів чи перекриттів.

Визначена вище кон'юнктура ринку, що базується на територіальній розосередженості виробничих вузлів («Вінницького трикутника») та високій динаміці житлового будівництва, ставить перед автомобільним перевізником бетону складне логістичне завдання. Наявність потужного парку автомобілів-бетонозмішувачів сама по собі не гарантує належного логістичного потенціалу, якщо підприємство не володіє інструментами подолання просторових обмежень міста.

Оскільки бетон є «динамічним» вантажем, логістичний потенціал підприємства має розглядатися не лише через призму виробничих потужностей, а й через здатність до адаптивного маневрування в межах наявної дорожньої мережі. У цьому контексті стратегічного значення набуває деталізація логістичного простору м. Вінниця - картування ключових транспортних артерій, аналіз їхньої пропускної здатності та ідентифікація «критичних точок» (заторів, мостових переходів, обмежень для важкої техніки). Саме через детальне картування маршрутів статичний ресурс підприємства трансформується у дієвий логістичний потенціал, здатний забезпечити безперервність будівельного циклу

2. Операційно-просторова компонента логістичного потенціалу містить картування критичних транспортних «артерій» м. Вінниця [13,14]. Для автомобільного перевізника рідкого бетону логістичний потенціал вимірюється не кілометрами, а хвилинами пропускної здатності. Проаналізуємо основні логістичні «артерії» міста крізь призму експлуатації автомобілів-бетонозмішувачів.

Транспортний коридор «Північ - Центр» (вул. Київська):

- значення: основний шлях від Стрижаського вузла до центральних об'єктів;

- проблема: хронічні затори в районі зупинки «Водоканал» та Центрального автовокзалу;

- вплив на потенціал: вимагає від перевізника наявності резервного часу («лагу») у 20-30 хвилин або використання транзиту через об'їзну дорогу (що збільшує витрати палива, але рятує бетон).

Транспортний коридор «Схід - Захід» (Немирівське шосе - вул. Лебединського - мости):

- значення: з'єднує виробничі потужності Тяжилова з новими забудовами (ЖК «Кемпінг», район вул. Чехова);
- проблема: перехрестя та транспортна розв'язка біля площі Перемоги;
- вплив на потенціал: тут потенціал реалізується через ритмічність. Треба розраховувати інтервал виїзду автомобілів-бетонозмішувачів так, щоб вони не скупчувалися перед мостом, створюючи чергу на об'єкті.

Транспортний коридор «Південь» (вул. Пирогова - Гніванське шосе):

- значення: обслуговування мікрорайонів «Поділля» та «Академічний»;
- проблема: висока інтенсивність руху громадського транспорту та обмеження для важкої техніки в районі ринку «Урожай»;
- вплив на потенціал: потребує залучення автотранспортних засобів з високим екологічним стандартом та маневреністю (короткобазові моделі).

Мостові переходи є одним із ключових елементів, через які формування логістичного потенціалу стикається з природними та техногенними бар'єрами міського середовища. Головним викликом є подолання русла річки Південний Буг. Мостові переходи через Центральний, Київський та Староміський мости є «критичними точками». Будь-яке ДТП або ремонтні роботи на цих «артеріях» миттєво знижують логістичний потенціал перевізника на 30-50% через ризик передчасного «тужавіння» бетону в пробках.

Обмеження руху в центральній частині міста передбачають дотримання жорстких правил пересування великогабаритного транспорту масою 30–40 т вулицями Соборною та Пирогова. Це зумовлює необхідність розроблення складних маршрутів об'їзду, що збільшує пробіг транспортних засобів, але забезпечує збереження цілісності вантажу.

Тобто, кон'юнктура Вінницького ринку бетонних сумішей вимагає від перевізника не просто «наявності автотранспортних засобів», а інтелектуальної логістики, здатної нівелювати ризики інфраструктурних викликів. Таким чином, логістичний потенціал автомобільного перевізника у Вінниці - це «карта знань». Підприємство, яке володіє актуальною інформацією про графік заторів та ремонтів (наприклад, на мостах), має вищий потенціал, ніж те, що має більше машин, але нехтує картографічним аналізом.

Детальний аналіз специфіки ринку бетонних сумішей та логістичних «артерій» м. Вінниця свідчить, що зовнішні умови функціонування перевізника є агресивними та мінливими. За таких обставин логістичний потенціал не може залишатися простою сумою наявних автомобілів. Він трансформується у складну внутрішню систему стримувань та противаг, яка дозволяє підприємству зберігати маркетингову стійкість навіть у пікові години заторів чи під час збоїв у роботі бетонних вузлів.

Для того, щоб перетворити територіальні виклики м. Вінниця на конкурентні переваги, необхідно систематизувати внутрішні ресурси перевізника. Це потребує розробки цілісної структурної моделі (матриці), де технічні параметри автомобільного парку синхронізуються з цифровими інструментами управління та професійними компетенціями персоналу. Саме така багатовимірна структура дозволяє оцінити реальну «потужність» логістичного потенціалу та його здатність до безперервного відтворення в умовах сучасного міста.

3. Ресурсна компонента логістичного потенціалу відображає матеріально-технічну базу перевізників бетонних сумішей у м. Вінниця, що визначає його логістичний потенціал [15,16]. Це спеціалізований рухомий склад, засоби механізації та виробничо-сервісна інфраструктура підприємства. На відміну від звичайного вантажного транспорту, кожен конструктивний агрегат, вузол чи система безпосередньо впливає на збереження фізико-хімічних властивостей вантажу. Основними показниками автомобілів-бетонозмішувачів є наступні.

- типорозмірний ряд: логістичний потенціал визначається збалансованістю парку. Для роботи в умовах щільної забудови необхідні компактні автотранспортні засоби з об'ємом барабану 6-7 м³ на двовісних шасі, що мають високу маневреність. Для масштабних заливок критичною є наявність

машин об'ємом 10-12 м³ та більше, що дозволяє зменшити кількість транспортних циклів та навантаження на дорожно-вуличну мережу;

- технічне оснащення безпосередньо барабана змішувача: потенціал підвищується за наявності систем термоізоляції барабанів (для роботи у Вінницьку спеку +30°C) та автономних систем промивки під високим тиском.

Засоби механізації вивантаження (автомобільні бетононасоси): у сучасних умовах м. Вінниці перевізник, який не має у складі власних бетононасосів, втрачає до 40% маркетингової стійкості. Важливим є наявність насосів з різним вильотом стріли: від 16-24 метрів (для приватного сектору) до 42-52 метрів (для багатоповерхового будівництва). Наявність комбінованих машин («PUMI» - змішувач і насос на одному шасі), що є рідкістю, але мега-ефективно для малих майданчиків у м. Вінниці.

Виробничо-сервісна інфраструктура:

- локальні ремонтно-обслуговуючі підрозділи: враховуючи, що середня швидкість руху автомобіля-бетонозмішувача через мости м. Вінниці у часи пік не перевищує 15–20 км/год, перевізник повинен мати власну сервісну службу, здатну виїхати на маршрут (наприклад, на вул. Немирівське шосе) для оперативного ремонту гідравліки чи барабану прямо у заторі;

- запасні частини: потенціал визначається наявністю на складі критичних вузлів (редуктори, ролики, гідронасоси), оскільки простій спеціалізованого рухомого складу через очікування запчастин з-за кордону в сезон інтенсивного будівництва є неприпустимим.

Ресурсна автономність: враховуючи нестабільність енергопостачання, до ресурсного блоку тепер обов'язково входить наявність потужних генераторів на території підприємства та мобільних паливозаправників. Це гарантує, що бетон не «захолоне» через те, що на заправці зникло електропостачання.

Техніко-параметричні характеристики рухомого складу формують логістичний потенціал перевізника бетону у м. Вінниця та визначаються сукупністю трьох ключових параметрів: місткості, маневреності та можливості подачі бетонної суміші.

Для розрахунку потенціалу виділені три типи автомобілів-бетонозмішувачів [16]:

- «міська маневреність» (6-7 м³): зазвичай на шасі з колісною формулою 4x2 або 6x4 (наприклад, MAN TGM або Iveco EuroCargo): габарити: довжина до 8 метрів; значення для Вінниці: *незамінні* для заливки фундаментів у приватному секторі (П'ятничани, Старе місто), де вузькі вулиці та радіуси повороту не дозволяють проїхати великогабаритним автотранспортні засоби;

- «стандарт замовлення» (9-10 м³): найпоширеніший клас (на шасі з колісною формулою 6x4 або 8x4, наприклад, Mercedes-Benz Arocs); вага з вантажем ~32-38 тонн; значення для Вінниці - основні транспортні засоби для житлових комплексів на «Вишенці». Вимагають чіткого розрахунку маршруту через мости з обмеженням навантаження на вісь;

- «магістральна потужність» (12-15 м³): важкі чотиривісні автотранспортні засоби або сідлові тягачі з напівпричепами; перевага - зменшують кількість транспортних циклів на великих об'єктах (наприклад, заливка плити під будівництво торгово-розважального центру); ризик - найнижча швидкість у заторах та обмежений доступ до багатьох будівельних об'єктів міста через вагу.

Логістичний потенціал перевізника підвищується, якщо він має техніку з такими характеристиками:

- лінійні бетононасоси (стаціонарні на шасі): для об'єктів, де неможливо розкласти стрілу (тунелі, внутрішні роботи);

- стрілові автомобільні бетононасоси (винос стріли від 24 до 52 м): продуктивність - від 90 до 160 м³/годину; важливо мати надбудови з Z-подібним складанням стріли, що дозволяє працювати під лініями електропередач та в обмеженому просторі Вінницьких дворів.

Необхідним є спеціальне обладнання для контролю якості, до якого належать:

- системи підігріву води та барабана: дозволяють возити бетон при температурі до -15°C (продовження сезону роботи у м. Вінниці);

- дозувальні пристрої для хімічних добавок: дозволяють водієві прямо на маршруті (якщо автомобіль-бетонозмішувач зупинився у заторі на вулиці Київській) додати пластифікатор для «омолодження» суміші.

Параметризація рухомого складу необхідна для переходу від загальних характеристик до об'єктивної оцінки спроможності підприємства. Вибір конкретних моделей автотранспортних засобів для роботи у м. Вінниці не є випадковим - він зумовлений архітектурно-планувальною специфікою міста (від вузьких вулиць історичного центру до масштабних будівельних майданчиків у нових мікрорайонах). У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики основних моделей спеціалізованого рухомого складу, що формують технічний базис логістичного потенціалу сучасного перевізника у м. Вінниці.

Таблиця 1 – Техніко-експлуатаційні параметри спеціалізованого рухомого складу для умов м. Вінниця

Table 1 – Technical and operational parameters of specialized rolling stock for the conditions of Vinnytsia

Модель (шасі)	Об'єм барабана, м³	Колісна формула	Радіус розвороту, м	Витрати палива, л/100 км	Екологічний стандарт	Сфера застосування у м. Вінниці
1. MAN TGM 18.250	6-7	4x2 / 6x4	7,5 - 8,5	22 - 26	Euro 6	Старе місто, П'ятничани, вузькі двори та екологічні зони Центру, заїзд у вузькі арки
2. Mercedes-Benz Arocs	9-10	8x4	9,5 - 10,5	32 - 38	Euro 5 / 6	Основна забудова (Вишенька, Поділля). Оптимальна вага для мостів, оптимальна потужність для підйомів (напр. вул. Р. Скалецького).
3. DAF CF 450	12	8x4 / 10x4	11,0 - 12,5	40 - 45	Euro 6	Магістральні поставки і ефективність на великих об'єктах (ЖК «Академічний», промислові зони)
4. PUMI (Cifa/Putzm.)	7 плюс насос	6x4 / 8x4	9,0	35 - 40	Euro 5	Універсал для малих майданчиків (бетонування перекриттів котеджів)

Порівняння параметрів, наведених в табл. 1, дає змогу зробити наступні висновки:

- аналіз моделей показує, що максимальний логістичний потенціал має те підприємство, чий парк є гетерогенним (змішаним). Наявність лише важких 12-кубових автотранспортних засобів обмежує логістичний потенціал перевізника, роблячи його «неповоротким» для замовлень у щільній забудові Центру чи Старого міста;

- для м. Вінниці, де логістика зав'язана на проїзді через мостові переходи, ключовим критичним параметром стає повна маса завантаженого автотранспортного засобу. Моделі класу 8x4 (Mercedes-Benz Arocs) є найбільш збалансованими для проїзду Київським чи Центральним мостами без порушення нормативів навантаження на вісь;

- наявність у парку технологічні синергованих автотранспортних засобів типу «PUMI» (змішувач-насос) кардинально змінює структуру потенціалу, дозволяючи підприємству закривати «нішеві» запити приватного будівництва, де швидкість розгортання на об'єкті є критичною;

- у структурі логістичного потенціалу витрати палива на 1 м³ доставленого бетону є ключовим індикатором. Для вінницького перевізника важливо, що в умовах заторів на Київському мосту або на площі Перемоги витрати зростають на 15–20% через роботу двигуна на холостому ходу для підтримки обертів барабана. Високий потенціал мають автомобілі з системою «Start-Stop» для двигуна при збереженні автономного приводу барабана;

- використання рухомого складу екологічного стандарту «Euro-6» дозволяє підприємству претендувати на участь у муніципальних проєктах реконструкції історичного центру м. Вінниці, де вимоги до рівня шуму та викидів є підвищеними. Це розширює «ринкове вікно» логістичного потенціалу.

Проте сама по собі наявність спеціалізованих автомобілів та інших складових матеріально-технічної бази є лише статичним ресурсом. Для того, щоб зрозуміти, наскільки ефективно цей ресурс може бути задіяним у реальному часі на дорогах м. Вінниці, необхідно перевести фізичні одиниці (кількість автотранспортних засобів, об'єм барабана та ін.) у площину кількісної оцінки.

4 Цифрова компонента логістичного потенціалу (Smart Potential) характеризується інтелектуальними системами управління в режимі реального часу [17,18]. Сучасний Smart Potential перевізника у м. Вінниці базується на трьох «китах»: телеметрії та контролі «життєдіяльності» вантажу, динамічній маршрутизації та моніторингу температурного режиму.

Телеметрія та контроль «життєдіяльності» вантажу:

- при використанні датчиків обертання змішувача диспетчер у реальному часі бачить, чи крутиться барабан чи ні. Якщо автомобіль стоїть у заторі біля Залізничного вокзалу і барабан зупинився - це сигнал тривоги (ризик застигання бетону).

- застосування датчиків вивантаження дає змогу системі фіксувати точний час початку та кінця зливу. Це дозволяє автоматично рахувати коефіцієнт використання насоса за часом.

Динамічна маршрутизація з урахуванням трафіку:

- інтеграція GPS-моніторингу з міськими сервісами трафіку. Якщо система бачить перекриття руху на Київському мосту, вона автоматично прокладає маршрут через об'їзну дорогу або Старе місто, перераховуючи очікуваний час прибуття;

- проведення геозонування, що дозволяє автоматично сповіщати виконроба на об'єкті (наприклад, на «Академічному»), коли автомобіль-бетонозмішувач перетинає умовну межу за 2 км до будмайданчика. Це дає час на підготовку до роботи насоса і воронки.

Моніторинг температурного режиму - встановлення безконтактних пірометрів або датчиків усередині барабана. Влітку, при критичному нагріванні суміші, система сигналізує про необхідність термінової заливки або додавання пластифікаторів.

Цифровізація перетворює транспортний цикл на адаптивний механізм, завдяки чому підприємство отримує:

- скорочення «порожніх» пробігів на 10–15%;
- зниження витрат палива (через оптимальні маршрути);

- 100% гарантію якості бетону, оскільки шлях кожної «порції» задокументований цифровим слідом.

Проте, якою б досконалою не була цифрова система та надійною техніка, фінальну точку в логістичному процесі ставить людина. Саме водій та диспетчер є тими ланками, що активують Smart-технології та приймають рішення в нестандартних ситуаціях на вулицях м. Вінниці. Тому завершальним елементом в структурі логістичного потенціалу є кадрова компонента, де професійна майстерність персоналу стає вирішальним чинником реалізації всього накопиченого потенціалу підприємства.

5. Кадрова компонента логістичного потенціалу характеризує людський чинник [19,20]. У специфічних умовах перевезення рідкого бетону у м. Вінниця людський фактор є «фінішним активатором» усіх попередніх блоків. Без кваліфікованого екіпажу найдорожчий Mercedes-Benz Arocs3 GPS-навігацією стає лише джерелом збитків. Саме тому особливого значення набувають фактори, які розглядаються нижче.

Професійність «бетонологіста» (водія автомобіля-бетонозмішувача):

- здатність управляти «живим» вантажем. Під час руху бетон у барабані постійно змінює центр ваги. Водій має відчувати машину на крутих поворотах (наприклад, з'їзд з Київського мосту на набережну), щоб не «лягти на бік» через інерцію суміші;

- технологічна пильність. Сучасний водій має розуміти різницю між пластичністю різних видів бетонів. Його потенціал - це здатність вчасно помітити, що бетон «сідає» в заторі на Пирогова, і прийняти рішення про збільшення обертів барабана або додавання води чи пластифікатора (за погодженням з лаборантом).

Компетентність водія доцільно розглядати як коригувальний множник у моделі логістичного потенціалу, оскільки недостатній рівень професійної підготовки або відсутність досвіду роботи з бетонними сумішами здатні істотно знижувати ефективність використання технічно справного рухомого складу через операційні помилки.

Знання «мікрогеографії» м. Вінниці. Досвідчений водій знає, під яким кутом треба заїжджати у двір на «Поділлі», щоб не зачепити припарковані автомобілі, і де на Старому місті під асфальтом «пливе» ґрунт, який не витримає 32-тонний автотранспортний засіб. Логістичний потенціал - це база знань у голові водія про стан під'їзних шляхів на конкретних об'єктах.

Комунікаційна стійкість (взаємодія «водій - виконроб»). Часто на об'єкті виникає конфлікт: «лийте швидше» або «чекайте, ми ще арматуру не дов'язали». Потенціал водія тут - це вміння відстояти технологічний регламент (щоб бетон не застиг у барабані через простій), не зіпсувавши стосунки з клієнтом.

Адаптація до Smart-технологій - це вміння користуватися планшетом для отримання електронних накладних та миттєвого звітування диспетчеру про затримки на переїздах (наприклад, на Тяжолові).

Проаналізувавши всі вище наведені компоненти логістичного потенціалу, сформований методичний підхід до кількісної оцінки ресурсного та логістичного потенціалу підприємства. Для того, щоб перевести техніко-експлуатаційні параметри автотранспортних засобів (табл. 1) у площину практичного управління, пропонується система показників, яка адаптована до специфіки перевезень бетону у м. Вінниці:

1) Коефіцієнт технічної готовності до екстремальних замовлень (K_{mz}). Цей показник відображає частку парку автомобілів-бетонозмішувачів, яка готова виїхати на лінію в режимі «тут і зараз». Він розраховується за формулою:

$$K_{m.z.} = \frac{N_{cnp}}{N_{zag}}, \quad (1)$$

де $N_{спр}$ - кількість технічно справних автомобілів-бетонозмішувачів з повним баком пального і промитими барабанами, одиниць;

$N_{заг}$ - загальна кількість автомобілів-бетонозмішувачів в парку перевізника, одиниць.

Для високої стійкості у сезон будівництва $K_{тг}$ має бути не нижчим за 0,85-0,9.

2) Сумарна одноразова місткість парку V_{Σ} .

Це критичний показник для великих об'єктів (наприклад, безперервна заливка фундаментної плити на 400 м³). Він визначається як сума об'ємів усіх барабанів парку автомобілів-бетонозмішувачів;

$$V_{парк} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_i. \quad (2)$$

де V_i - об'єм барабана конкретної моделі автомобіля-бетонозмішувача, м³.

Це «ударна сила» перевізника. Якщо замовлення перевищує $V_{парк}$ у 3 рази, треба розраховувати потенціал через оборотність.

3) Показник часової прохідності транспортних «артерій» міста $T_{арт}$. Це специфічний показник для м. Вінниці, який корегує технічну потужність рухомого складу залежно від розташування району міста:

- центральна зона (вул. Соборна, вул. Пирогова): $T_{арт} = 0,4$ (автотранспортний засіб працює на 40% своєї технічної швидкості).

- периферійна зона (об'їзна дорога, Гніванське шосе): $T_{арт} = 0,8$.

4) Інтегральний показник логістичної потужності $P_{лог.}$.

Це головна формула, яку ми пропонуємо для статті:

$$P_{лог.} = \Sigma(V_i \cdot K_{т.г.}) \cdot \frac{T_{т.ж.б.}}{T_{тр.ц.}}, \quad (3)$$

де $T_{т.ж.б.}$ - термін «життя» бетону (зазвичай 2-3 год.);

$T_{тр.ц.}$ - повний час транспортного циклу з урахуванням заторів, год.

Розрахунок за цією формулою дозволяє диспетчеру чітко розуміти: якщо $T_{ізод}$ (наприклад, через затор на Київському мосту) наближається до $T_{т.ж.б.}$, то логістичний потенціал перевізника падає до нуля, незалежно від того, скільки нових «Mercedes-Benz Arocs» перебуває у парку.

5) Уточнена математична модель логістичного потенціалу

Додаємо в нашу формулу температурний коефіцієнт ($K_{тем.}$), адже у м. Вінниці в липні (+32°C) бетон «живе» вдвічі менше, ніж у жовтні (+10°C).

Пропонується розраховувати реальну провізну здатність перевізника за формулою:

$$Q_{реал} = \frac{V_{парк} \cdot K_{т.г.} \cdot K_{тем.}}{T_{тр.ц.}}, \quad (4)$$

де $K_{тем.}$ - температурний коефіцієнт «виживання» бетону.

Він має значення від 1,0 при +15°C до 0,6 при +30°C.

Розглянемо використання цієї формули на прикладі. Припустимо, що є замовлення на заливку фундаменту житлового комплексу, який будується в мікрорайоні «Поділля». Бетонний вузол знаходиться на вул. Київській. Парк перевізника складається з 5 одиниць автомобілів-бетонозмішувачів Mercedes-Benz Arocs з барабанами по 10 м³ кожен. Разом $V_{парк} = 50 \text{ м}^3$. $K_{м.з.} = 0,9$ (4 автомобілі технічно справні, один - перебуває на плановому ТО). Погодні умови: липень, спека +28°C. Приймаємо $K_{тем.} = 0,7$ (бетон застигає швидше, ризики вищі). Трафік: через затори на Київському мосту та ремонт доріг $T_{тр.ч}$ (завантаження - рух з вантажем - вивантаження - холостий пробіг) становить 2,5 години. За такого сценарію

$$Q_{реал} = \frac{50 \cdot 0,9 \cdot 0,7}{2,5} = \frac{31,5}{2,5} = 12,6 \text{ м}^3 / год.$$

Результати розрахунку показують, що перевізник може подавати на об'єкт лише 12,6 кубів бетону за годину. Якщо замовник вимагає темп 25 м³/год (щоб насос простоював), такого потенціалу недостатньо. Шляхи вирішення проблеми:

- залучення ще 5 автомобілів-бетонозмішувачів від іншого перевізника;
- використання хімічних добавок (збільшити $K_{тем.}$);
- перенесення заливки на нічний час ($T_{тр.ч}$ зменшиться з 2,5 до 1,5 години).

Зміцнення логістичного потенціалу трансформується у конкретні фінансові показники підприємства через три канали оптимізації [21,22]:

1) Пряма економія ресурсів:

- паливна складова. Завдяки динамічній маршрутизації (об'їзд заторів на мостах м. Вінниці) пробіг автомобіля-бетонозмішувача з працюючим барабаном скорочується на 8-12%. При середній витраті 35 л/100 км для Mercedes-Benz Arocs, це дає економію близько 250-300 грн на кожному транспортному циклі;

- зниження експлуатаційних витрат. Своєчасний моніторинг технічного стану дозволяє уникати аварійних поломок змішувача з бетоном, де вартість втраченого вантажу та очищення барабана може сягати 50000-80000 грн.

2) Підвищення продуктивності техніки - підвищення завантаження автобетононасоса шляхом точного графіку подачі бетонозмішувачів дозволяє виконувати той самий обсяг робіт вдвічі швидше. Це вивільняє техніку для інших об'єктів в ту саму зміну, подвоюючи виторг за реалізацію продукції.

3) Зростання ринкової частки (адаптивність, нічний графік та спецзамовлення).

Здатність працювати за високих температур або у складних локаціях (наприклад, район Старого міста) дозволяє перевізнику встановлювати преміальну націнку (10-15%) за складність логістики. Замовник готовий платити більше за гарантію того, що фундамент буде залитий без «швів».

В табл. 2 наведені інструменти підвищення складових логістичного потенціалу та їх економічний ефект.

Таблиця 2 – Інструменти підвищення логістичного потенціалу та економічний ефект

Table 2 – Tools for increasing logistics potential and economic effect

Складова потенціалу	Інструмент	Економічний результат (%)
Hard	Диференційований парк (6–12 м ³)	+15% до обсягів замовлень у Центрі
Smart	GPS + Контроль обертів бочки	-10% витрат на ПММ та ремонти
Human	Кваліфікація водія та диспетчера	-20% часу простою на об'єктах

Таким чином, формування та оцінка логістичного потенціалу перевізника рідкого бетону у м. Вінниця є не лише технологічним завданням, а стратегічною інвестицією. Економічний аналіз підтверджує, що синергія сучасного рухомого складу, цифрового контролю та людського капіталу створює стійку модель, здатну генерувати прибуток навіть за умов високої ринкової волатильності та складних інфраструктурних обмежень міста.

Висновки. У результаті проведеного дослідження формування логістичного потенціалу підприємства-перевізника рідкого бетону в умовах м. Вінниця було отримано такі результати:

- уточнено сутність логістичного потенціалу спеціалізованого перевізника: визначено, що для логістики рідкого бетону це не статична сукупність ресурсів, а динамічна здатність системи забезпечити безперервність циклу «доставка - укладання» в межах жорсткого часового ліміту збереження властивостей суміші. Головним мірилом потенціалу є «часова дистанція», а не географічна відстань;

- проаналізовано ринкову кон'юнктуру Вінницького регіону: виявлено специфіку «Вінницького трикутника» виробничих потужностей бетонних сумішей (Стрижавка - Тяжлів - Гніванське шосе), що вимагає від перевізника високої мобільності. Встановлено, що попри складні умови, темпи будівництва у Вінниці створюють стабільний попит на бетон високих марок (М300–М400), що підвищує вимоги до логістичної стійкості;

- розроблено методику кількісної оцінки потенціалу: запропоновано інтегральну математичну модель розрахунку логістичної потужності, яка вперше враховує температурний коефіцієнт навколишнього середовища та реальну пропускну здатність транспортних «артерій» міста. Це дозволяє диспетчерським службам об'єктивно оцінювати ризики «втрати вантажу» у пікові години навантаження на мости м. Вінниці;

- обґрунтовано структуру логістичного потенціалу: доведено, що максимальна ринкова адаптивність досягається лише за умови синергії трьох блоків:

- Hard Potential: диференційований парк автомобілів-бетонозмішувачів з об'ємом барабанів (6-12 м³) та власних автомобільних бетононасосів;

- Smart Potential: системи цифрової телеметрії обертів барабана та GPS-моніторингу трафіку в реальному часі;

- Human Potential: висока кваліфікація водіїв, що знають специфіку під'їздів до мікрорайонів «Поділля», «Академічний» та Центру міста.

- визначено економічну ефективність: розрахунки підтвердили, що зміцнення логістичного потенціалу дозволяє знизити витрати паливно-мастильних матеріалів на 8–12% та підвищити коефіцієнт використання дорогих спеціалізованих автомобілів (бетононасосів) з 34% до 70%, що прямо впливає на конкурентоспроможність перевізника на регіональному ринку.

Перелік посилань

1. Правила перевезення вантажів автомобільним транспортом в Україні. Затверджені наказом Мінтрансу України від 14.10.1997р. № 363 (із змінами і доповненнями) в редакції від 05.12.2024 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0649-19#Text>, вільний. (Дата звертання 22.02.2026).

2. Технологія бетону : підручник / за ред. П. В. Захарченка. Київ : КНУБА, 2021. 420 с.

3. Державний стандарт України. Бетони готові до використання. Технічні умови : ДСТУ Б В.2.7-96-2000. Київ : Держбуд України, 2000. 24 с.

4. Крикавський Є. В. Логістичне управління : підручник. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2005. 684 с.

5. Логістика : навч. посіб. / Тридід О. М., Гриньова В. М., Лазарева З. М. та ін. Харків : ВД «ІНЖЕК», 2008. 176 с.

6. Чухрай Н. І. Логістичне обслуговування : підручник. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2006. 292 с.

7. Шинкаренко В. Г., Левченко О. П. Формування логістичного потенціалу автотранспортного підприємства. Економіка транспортно-логістичного комплексу. 2011. Вип. 18. С. 5–15.

8. Класифікація видів економічної діяльності ДК 009:2010 : від 11 жовт. 2010 р. № 457 / Держспоживстандарт України. Київ, 2010.
9. Офіційний сайт ПБГ «Ковальська». [Електронний ресурс]. URL: <https://beton.kovalska.com>.
10. Вінниця у цифрах : статистичний довідник / Головне управління статистики у Вінницькій області. Вінниця, 2024. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.vn.ukrstat.gov.ua>.
11. Аналіз ринку будівельних матеріалів України : звіт консалтингової компанії. Будівельний журнал. 2025. № 2. С. 12–18.
12. Про стан та перспективи розвитку будівельної галузі України : аналіт. доп. / Нац. ін-т стратег. дослідж. Київ, 2025. 45 с.
13. Офіційний сайт Вінницької міської ради. Транспортна модель міста. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.vmr.gov.ua>.
14. Транспортна модель міста Вінниці : аналіт. звіт / Агенція просторового розвитку. Вінниця, 2023. [Електронний ресурс]. URL: <https://spatial.vmr.gov.ua>.
15. Полянський О. С. Управління технічним станом парку спеціалізованих автомобілів. Транспортні системи та технології перевезень. 2023. Вип. 25. С. 88–95.
16. Спеціалізований рухомий склад автомобільного транспорту : навч. посіб. / В. П. Сахно та ін. Житомир : ЖДТУ, 2021. 364 с.
17. Іванов В. В. Цифровізація транспортно-логістичних процесів як чинник підвищення потенціалу підприємства. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2024. № 81. С. 45–54.
18. Цифровізація транспортних систем : монографія / за ред. А. М. Новікової. Київ : ДП «Державтотранснєдпроект», 2024. 312 с.
19. Психологія праці водія транспортного засобу : навч. посіб. / за ред. М. В. Кришталі. Київ : Логос, 2022. 198 с.
20. Кодекс професійної етики та стандартів операторів спецтехніки. Будівельний менеджмент. 2025. № 5. С. 34–40.
21. Економіка та управління автотранспортним підприємством : навч. посіб. / В. Г. Шинкаренко. Харків : ХНАДУ, 2022. 340 с.
22. Конкурентоспроможність транспортних підприємств : монографія / за ред. О. В. Світличного. Київ : Центр навч. л-ри, 2023. 214 с.

FACTORS OF FORMATION AND ASSESSMENT OF THE LOGISTICS POTENTIAL OF ROAD CARRIERS OF CONCRETE MIXTURES IN URBAN AGGLOMERATION

Tsymbal Serhiy V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: tsymbal_s_v@ukr.net, tel. +380937602079, <https://orcid.org/0009-0005-1612-968X>

Makarova Tamara V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: tomamakarova@ukr.net, tel. +380731235169, <https://orcid.org/0000-0003-0669-8350>

Varchuk Vyacheslav V., Assistant of Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: vvvarchuk@vntu.edu.ua, tel. +380678980719, <https://orcid.org/0009-0005-2622-9780>

Abstract. The theoretical and applied aspects of the formation of the logistics potential of enterprises specializing in the transportation of concrete mixtures in the city of Vinnytsia are studied. The authors have clarified the essence of the concept of "logistics potential" through the prism of the time determinant and the physicochemical properties of the cargo. A mathematical model for assessing logistics capacity is proposed, which takes into account the temperature coefficient and the specifics of urban traffic (load on bridge crossings). The structure of logistics potential is substantiated, which includes infrastructure, spatial, resource, digital and personnel components. It is proven that the synergy of these elements ensures the market adaptability of the carrier and increases the economic efficiency of using specialized rolling stock by 15-20%.

Keywords. Logistics potential, liquid concrete, concrete mixer truck, Vinnytsia city, temperature coefficient, Smart logistics, market adaptability, transport infrastructure.

References

1. Rules for the carriage of goods by road in Ukraine. Approved by the order of the Ministry of Transport of Ukraine dated 14.10.1997. No. 363 (with amendments and additions) in the edition dated 05.12.2024. [Electronic resource]. – Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0649-19#Text>, free. (Date of access 22.02.2026). [in Ukrainian]
2. Concrete technology: textbook / edited by P. V. Zakharchenko. Kyiv: KNUBA, 2021. 420 p. [in Ukrainian]
3. State standard of Ukraine. Ready-to-use concrete. Technical conditions: DSTU B V.2.7-96-2000. Kyiv: State Construction Agency of Ukraine, 2000. 24 p. [in Ukrainian]
4. Krykavskiy E. V. Logistics management: textbook. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2005. 684 p. [in Ukrainian]
5. Logistics: a textbook / Tridid O. M., Grynnyova V. M., Lazareva Z. M. and others. Kharkiv: Publishing House "INZHEK", 2008. 176 p. [in Ukrainian]
6. Chukhray N. I. Logistics service: a textbook. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2006. 292 p. [in Ukrainian]
7. Shynkarenko V. G., Levchenko O. P. Formation of the logistics potential of a motor transport enterprise. Economics of the transport complex. 2011. Issue 18. P. 5–15. [in Ukrainian]
8. Classification of types of economic activity DK 009:2010: dated 11 Oct. 2010 No. 457 / State Consumer Standard of Ukraine. Kyiv, 2010. [in Ukrainian]
9. Official website of PBG "Kovalska". [Electronic resource]. URL: <https://beton.kovalska.com>. [in Ukrainian]
10. Vinnytsia in figures: statistical reference book / Main Department of Statistics in Vinnytsia region. Vinnytsia, 2024. [Electronic resource]. URL: <https://www.vn.ukrstat.gov.ua>. [in Ukrainian]
11. Analysis of the building materials market of Ukraine: report of a consulting company. Construction Journal. 2025. No. 2. P. 12–18. [in Ukrainian]
12. On the state and prospects for the development of the construction industry of Ukraine: analytical supplement / National Institute of Strategic Research. Kyiv, 2025. 45 p. [in Ukrainian]
13. Official website of Vinnytsia City Council. Transport model of the city. [Electronic resource]. URL: <https://www.vmr.gov.ua>. [in Ukrainian]
14. Transport model of the city of Vinnytsia: analytical report / Agency for spatial development. Vinnytsia, 2023. [Electronic resource]. URL: <https://spatial.vmr.gov.ua>. [in Ukrainian]
15. Polyanskyi O. S. Management of the technical condition of the fleet of specialized vehicles. Transport systems and transportation technologies. 2023. Issue 25. P. 88–95. [in Ukrainian]
16. Specialized rolling stock of road transport: a manual. / V. P. Sakhno et al. Zhytomyr: ZhDTU, 2021. 364 p. [in Ukrainian]
17. Ivanov V. V. Digitalization of transport and logistics processes as a factor in increasing the potential of the enterprise. Bulletin of the economy of transport and industry. 2024. No. 81. P. 45–54. [in Ukrainian]
18. Digitalization of transport systems: monograph / edited by A. M. Novikova. Kyiv: State Enterprise "Derzhavtotransndiproekt", 2024. 312 p. [in Ukrainian]
19. Psychology of work of a vehicle driver: textbook / edited by M. V. Kryshchal. Kyiv: Logos, 2022. 198 p. [in Ukrainian]
20. Code of professional ethics and standards of operators of special equipment. Construction management. 2025. No. 5. P. 34–40. [in Ukrainian]
21. Economics and management of a motor transport enterprise: textbook / V. G. Shynkarenko. Kharkiv: KhNADU, 2022. 340 p. [in Ukrainian]
22. Competitiveness of transport enterprises: monograph / edited by O. V. Svitlychny. Kyiv: Center for training of l-ry, 2023. 214 p. [in Ukrainian]

Дата надходження до редакції 13.02.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 26.02.2026.

Наукове видання

АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ І ДОРОЖНЄ БУДІВНИЦТВО

Науковий журнал

Заснований у 1964 р.

Випуск 119/2026

Головний редактор *Бубела А.В.*

Відповідальний секретар *Петрович В.В.*

Статті публікуються в авторській редакції

Оформлення, стиль та зміст наукового журналу є об'єктом авторського права і захищається законом. Відповідальність за зміст і достовірність наведених даних, стилістику та орфографію статей несуть автори публікацій.

Редакція залишає за собою право редагувати та скорочувати подані матеріали.

Усі статті одержали позитивну оцінку незалежних рецензентів.

Передрук розміщених у журналі матеріалів дозволяється тільки за письмовою згодою редакції.

Оригінал-макет виготовлено в редакції журналу
Автомобільні дороги і дорожнє будівництво

Комп'ютерна верстка
Петрович В.В.
Чечуга О.С.

Коректура англomовна та українськомовна
Бондаренко Л.П., Усиченко О.Ю., Харченко А.М.

Адреса редколегії:

01010, Україна, м. Київ,
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 138
Національний транспортний університет,
тел. + 38 (044) 280 7338

e-mail: avtodorogi-ntu@ukr.net,

http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/avtodorogi_i_stroitelstvo.html

Зареєстровано:

Міністерством юстиції України.
Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 25199-15139ПР від 20.07.2022 р.

Засновник та видавець:

Національний транспортний університет,
01010 м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка,
1. тел. +38 (044) 280 7338,
e-mail: avtodorogi-ntu@ukr.net
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1218 від 30.01.2003 р.

Виготовлювач:

Національний транспортний університет,
редакційно-видавничий відділ
01103, Україна, м. Київ, вул. М. Бойчука, 39.
тел.: +38 (044) 284 2626,
e-mail: nturv@gmail.com

Підписано до друку 26.03.2026 р. Формат 60x84^{1/8}
Папір офс. Гарнітура Times New Roman. Друк ризограф.
Вк. 7. Наклад 200. Зам.

Scientific publication
ROADS AND ROAD CONSTRUCTION

Scientific journal

Founded in 1964

Issue 119/2026

Editor-in-Chief **Andrej Bubela.**

Executive Secretary **Volodymyr Petrovich.**

Articles are published in the author's edition

The design, style and content of a scientific journal is the object of copyright and is protected by law
The authors of the publications are responsible for the content and accuracy of the given data, stylistics and spelling of the articles.

The editors reserve the right to edit and shorten the submitted materials

All articles were positively evaluated by independent reviewers

Reprinting of materials published in the journal is allowed only with the written consent of the editors

The original layout was made by the magazine
Highways and road construction

Computer typesetting
Volodymyr Petrovich
Oleksandr Chechuha

Proofreading in English and Ukrainian
Ludmila Bondarenko, Olena Usichenko, Anna Kharchenko/

Address of the editorial board:

01010, Ukraine, Kyiv,
street M. Omelyanovich-Pavlenko, 1, room 138
National Transport University,
tel. + 38 (044) 280 73 38
e-mail: avtodorogi-ntu@ukr.net,
http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/avtodorogi_i_stroitelstvo.html

Registered:

Ministry of Justice of Ukraine.
Certificate of state registration of
KV No. 25199-15139PR dated June 20, 2022.

Founder and publisher:

National Transport University,
01010 Kyiv, street M. Omelyanovich-Pavlenko,
1. tel. +38 (044) 280 7338,
e-mail: avtodorogi-ntu@ukr.net
Certificate of the subject of publishing
SC № 1218 dated 30.01.2003

Manufacturer:

National Transport University, Editorial and
Publishing Department
01103, Ukraine, Kyiv, street M. Boychuk, 39.
tel.: +38 (044) 284 2626,
e-mail: nturv@gmail.com

Signed for printing 26.03.2026 p. Format 60x84^{1/8}
Paper offs. Times New Roman headset. Print risogr.
Vk. 7. Circulation 200. Order.