

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Сучасні технології
та методи розрахунків у будівництві

Збірник наукових праць

Випуск 25

Луцьк
2026

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

LUTSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

**Modern technologies
and methods of calculations in construction**

Collection of scientific articles

Volume 25

Lutsk
2026

Засновник та видавець: Луцький національний технічний університет

Збірник публікує результати оригінальних фундаментальних і прикладних досліджень у межах кластеру G - «Промислові і будівельні технології, логістика, транспорт» (відповідно до Наказу Міністерства освіти і науки України від 19.01. 2026 року), за спеціальностями: G17 – Архітектура та містобудування, G18 – Геодезія та землеустрій, G19 – Будівництво та цивільна інженерія.

Збірник зареєстрований Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення (рішення № 40 від 11.01.2024 р., ідентифікатор медіа R30-02453)

До 01.06 2026 року збірник включено Міністерством освіти і науки України до Переліку наукових фахових видань України (**категорія Б**), в яких можуть публікуватися результати дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора та кандидата технічних наук за спеціальностями: 192 Будівництво та цивільна інженерія (наказ Міністерства освіти і науки України № 886 від 02.07.2020); 113 Прикладна математика; 122 Інформатика (наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020).

Матеріали збірника рекомендовані до друку на засіданні вченої ради ЛНТУ (протокол № 12 від 28 травня 2026 р.)

Редакційна колегія:

Головний редактор – **Олександр Андрійчук**, к.т.н., професор (ЛНТУ, Луцьк)

Заступник редактора – **Володимир Самчук**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк)

Відповідальний редактор – **Дмитро Кислюк**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк)

Данута Барнат-Гулек, д.т.н., доцент (Люблінська політехніка, Польща); **Ансгар Брунн**, доктор інженерії, професор (Технічний університет прикладних наук, Вюрцбург-Швайнфурт, Німеччина); **Тереза Руцінська**, д.т.н., професор (Західнопоморський технологічний університет у Щецині, Польща); **Малгожата Штубецька**, доктор наук, доцент (Бидгоська політехніка, Польща); **Агнешка Шльосарчик**, доктор інженерії, професор (Познанський технічний університет, Польща); **Марта Скіба**, доктор архітектури, професор (Зеленогурський університет, Польща); **Ольга Ужєгова**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Ольга Борзяк**, д.т.н., професор (Західнопоморський технологічний університет, м. Щецин, Польща); **Софія Бурчєня**, к.т.н., доцент (Львівський університет ветеринарної медицини, Львів); **Олег Верешко**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Святослав Гомон**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне); **Оксана Дзюбинська**, к.е.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Оксана Дячок**, доктор архітектури, професор (Західноукраїнський НУ, Тернопіль); **Сергій Дробишинець**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Олександр Мельник**, к.т.н., доцент (ВНУ, Луцьк); **Павло Сунак**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Сергій Ужєгов**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Анна Уль**, д.т.н., професор (ВНУ, Луцьк); **Роман Хміль**, д.т.н., професор (НУ «Львівська політехніка», Львів); **Олександр Чапюк**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк).

Адреса редакції: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, Луцький національний технічний університет, кафедра будівництва та інфраструктурної інженерії, телефон +380(50)9242708
e-mail: mtmcc@lnu.edu.ua сайт: <https://eforum.lnu.edu.ua/index.php/construction/>

**Modern technologies and methods of calculations in construction. Lutsk, LNTU.
2025, Volume 25, 448 p. ISSN 2410-6208 (print)**

Founder and publisher: Lutsk National Technical University

The journal publishes the results of original fundamental and applied research within Cluster G “Industrial and Construction Technologies, Logistics, Transport” (in accordance with the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated January 19, 2026), in the following specialties: G17 – Architecture and Urban Planning, G18 – Geodesy and Land Management, G19 – Building and Civil Engineering.

The National Council of Ukraine registers the collection on Television and Radio Broadcasting (resolution No. 40 dd 11.01.2024, Media ID R30-02453).

Until June 1, 2026, the collection is included by the Ministry of Education and Science of Ukraine in the List of scientific professional publications of Ukraine (**category B**), which can publish the results of theses for doctoral and candidate of technical sciences in specialties: 192 Construction and Civil Engineering (order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 886 dd 02.07.2020); 113 Applied Mathematics; 122 Computer Science (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine №409 dd 17.03.2020).

The materials of the collection were recommended for publication at the meeting of the academic council of the LNTU (protocol No. 12 of May 28, 2026).

Editorial Board:

Editor-in-Chief – **Oleksandr Andriichuk**, Ph.D., Prof. (LNTU, Lutsk)

Deputy Editor – **Volodymyr Samchuk**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk)

Responsible Editor – **Dmytro Kysliuk**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk)

Danuta Barnat-Hunek, DSc (Eng.), As. Prof. (Lublin University of Technology, Poland); **Ansgar Brunn**, DSc (Eng.), Prof. (Technical University of Applied Sciences, Würzburg-Schweinfurt, Germany); **Teresa Rucińska**, Dr. habil., DSc (Tech.), Prof. (West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Poland); **Malgorzata Sztubecka**, DSc, As. Prof. (Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland); **Agnieszka Ślosarczyk**, DSc (Eng.), Prof. (Poznan University of Technology, Poland); **Marta Skiba**, D.Arch., Prof. (University of Zielona Gora, Poland); **Olha Uzhehova**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Olha Borziak**, DSc (Eng.), Prof. (West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Poland); **Sofiia Burchenia**, Ph.D., As. Prof. (Lviv University of Veterinary Medicine and Biotechnology, Lviv); **Oleh Vereshko**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Sviatoslav Homon**, Dr of Techn. Sc., Prof. (NUWEE, Rivne); **Oksana Dziubynska**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Oksana Diachok**, D.Arch., Prof. (West Ukrainian NU, Ternopil); **Serhii Drobyshynets**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Oleksandr Melnyk**, Ph.D., As. Prof. (VNU, Lutsk); **Inna Parfentieva**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Pavlo Sunak**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Serhii Uzhehov**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Anna Uhl**, DSc (Eng.), Prof. (VNU, Lutsk); **Oleksandr Chapiuk**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk).

Editorial office address: 43018, Lutsk, Lvivska St., 75, Lutsk National Technical University, Department of Construction and Infrastructure Engineering, phone +380(50)9242708
e-mail: mtmcc@lntu.edu.ua сайт: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/>

© *Lutsk National*

Technical University, 2026

ISSN 2410-6208

УДК 624.014

В. А. Пашинський*

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-6399>

Кафедра Будівельних дорожніх машин і будівництва

Центральноукраїнський національний технічний університет, просп. Університетський, 8, Кропивницький, Україна, 25006

М. В. Пашинський

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-523X>

Кафедра Будівельних дорожніх машин і будівництва

Центральноукраїнський національний технічний університет, просп. Університетський, 8, Кропивницький, Україна, 25006

*автор-кореспондент, e-mail: pva.kntu@gmail.com

Аналіз конструктивних параметрів і вагових характеристик сталевих балок з гнучкою стінкою

Цитувати як:

Пашинський, В. А., Пашинський, М. В. (2026). Аналіз конструктивних параметрів і вагових характеристик сталевих балок з гнучкою стінкою. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 5-17. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-01)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті наведено результати аналізу параметрів поперечного перерізу та вагових характеристик сталевих балок з гнучкою стінкою. Шляхом експериментального проектування балок прольотами 12...36 м під навантаження 5...45 кН/м отримані та описані простими апроксимуючими виразами залежності раціональної висоти перерізу, умовної гнучкості стінки та погонної маси балок від їх прольоту, погонного навантаження та розрахункового опору сталі.

Розрахунки виконані з використанням розробленого в середовищі Microsoft Excel розрахункового бланку, який дозволяє в інтерактивному режимі підібрати двотавровий переріз балки мінімально можливої маси за умов виконання граничних нерівностей та конструктивних вимог до балок з гнучкою стінкою, встановлених ДБН В.2.6-198:2014 "Сталеві конструкції". Проаналізовано 75 балок (по 5 значень прольоту й навантаження і 3 значення розрахункового опору сталі). Для кожної комбінації прольоту й навантаження раціональна висота стінки обрана з кількох висот за критерієм мінімуму погонної маси балки або за критерієм жорсткості.

Встановлено, що раціональна висота перерізу, умовна гнучкість стінки та металоемність балок загалом зростають при збільшенні прольоту й погонного навантаження. Збільшення розрахункового опору сталі призводить до зменшення висоти й металоемності балок малих прольотів під великими навантаженнями, але може викликати зростання висоти й металоемності при великих прольотах і малих навантаженнях, коли вирішальним є критерій жорсткості. Це ставить під сумнів доцільність використання сталей підвищеної міцності для виготовлення балок з гнучкими стінками.

Отримані залежності дозволяють за заданими значеннями прольоту, погонного навантаження та розрахункового опору сталі обрати висоту й умовну гнучкість стінки, які забезпечують вибір раціонального перерізу балки з гнучкою стінкою, а також попередньо оцінити її металоємність.

Ключові слова: балки з гнучкою стінкою, раціональна висота балки, умовна гнучкість стінки, металоємність

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Балки з гнучкою стінкою є одним з ефективних типів сталевих конструкцій [1, 2, 3]. Їх особливість полягає в тому, що тонка стінка двотаврового перерізу працює в закритичній стадії, може втрачати місцеву стійкість та частково виключатися з роботи на згин. При цьому істотне зменшення товщини стінки та площ полиць унаслідок зростання висоти балки обумовлює зниження металоємності балок з гнучкою стінкою порівняно зі звичайними зварними балками [2, 3].

Дослідженню роботи балок з гнучкою стінкою, у тому числі у складі рамних конструкцій, присвячені роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, зокрема [3...9]. У статтях [3, 4] за результатами аналізу відомих методів розрахунку запропонована умова міцності двотаврових елементів рам змінної жорсткості з гнучкою стінкою при одночасній дії поздовжньої та поперечної сили й згинального моменту. У роботі [5], яка базується на результатах випробувань рами натурних розмірів, запропонована методика розрахунку елементів каркасу з гнучкими стінками на основі розгляду несучої здатності поясів та максимальних напружень у деформованій стінці. Стаття [6] присвячена урахуванню спільної роботи тонкостінної балки з покрівельним настилом, прикріпленим до верхнього поясу. Розрахунки на основі теорії тонкостінних стержнів В.З. Власова показали, що урахування роботи сталевого профільованого настилу, який утримує балку від закручування, підвищує несучу здатність балок на 18...25%. Дослідження [7] присвячене обґрунтуванню нового методу оцінювання опору зсуву тонких стінок, який об'єднує аналіз стінок підкріплених та не підкріплених ребрами жорсткості. В статтях [8, 9] аналізуються методи чисельного моделювання роботи балок з гнучкими стінками, результати яких порівнюються з експериментальними даними.

Загалом можна зробити висновок, що методи розрахунку балок з гнучкою стінкою ґрунтуються на теорії місцевої стійкості та на урахуванні закритичної роботи стінки. Аналіз поведінки тонких пластин часто здійснюється шляхом моделювання за методом скінченних елементів та верифікується за результатами експериментальних випробувань.

Практична інженерна методика розрахунку та конструктивні вимоги до балок з гнучкою стінкою унормовані в ДБН [10]. Згідно цих норм, такі балки виготовляються зі сталей з границею текучості до 345 МПа та використовуються при погонних навантаженнях до 50 кН/м. Умовна гнучкість стінки повинна знаходитися в межах 6...13. В ДБН [10] надані формули для перевірки міцності та жорсткості балок з гнучкою стінкою, а також гранично допустимі значення звису стиснутого поясу, відношення площі поясу до площі стінки, вимоги до постановки поперечних ребер жорсткості. Недоліком методики [10] є відсутність рекомендацій щодо встановлення раціональної висоти стінки, яка істотно впливає на площу поперечного перерізу та відповідно – на витрати сталі на балку.

Мета й завдання дослідження. Мета даного дослідження полягає у виявленні залежностей раціональної висоти, умовної гнучкості стінки та металоемності балок з гнучкими стінками від їх прольоту, погонного навантаження та розрахункового опору сталі, які дозволять скомпонувати раціональний переріз балки при відомих початкових даних. Для цього необхідно виконати експериментальне проектування балок з гнучкими стінками при різних можливих комбінаціях вказаних факторів, проаналізувати й узагальнити отримані результати, виявити й описати вказані вище залежності апроксимуючими виразами, зручними для практичного використання.

Передумови та методи дослідження

Залежності параметрів перерізу та вагових характеристик балок з гнучкою стінкою від їх прольоту та граничного розрахункового значення погонного навантаження встановлені шляхом експериментального проектування. Відповідно до можливого призначення в перекриттях і покриттях будівель, розглянуті балки прольотами $L = 12, 18, 24, 30, 36$ м. Мінімальне навантаження від снігу в першому районі за ДБН [11] та легкої покрівлі зі сталевого профільованого настилу по прогонах становить близько 1000 Па, що при кроці балок 4 м дає погонне навантаження $q = 4$ кН/м. Згідно з рекомендацією ДБН [10], максимальне навантаження на балки з гнучкою стінкою обмежене значенням $q = 50$ Н/мм. Тому розглядаються балки під граничні розрахункові значення погонного навантаження $q = 5, 15, 25, 35, 45$ кН/м. Усі балки запроєктовані з трьох сталей з розрахунковими опорами $R_y = 240, 290, 340$ МПа, що відповідає рекомендації ДБН [10] проектувати балки з гнучкою стінкою зі сталей з границею текучості до 345 Н/мм².

Експериментальне проектування виконане в середовищі Microsoft Excel з використанням розробленого розрахункового бланку, який дозволяє в інтерактивному режимі підбирати раціональні перерізи балок з

гнучкою стінкою за умови виконання граничних нерівностей та конструктивних вимог ДБН [10].

Розроблений розрахунковий бланк реалізує виконання вказаних в ДБН [10] та описаних вище перевірок жорсткості балки, міцності перерізу в усіх відсіках стінки та конструктивних обмежень, а також обчислення погонної маси балки з урахуванням ребер жорсткості, встановлених згідно з вимогами ДБН [10].

При компонованні кожної з 75 балок підбір перерізу розпочинається з визначення оптимальної та мінімальної висоти балки за відомими формулами [1], після чого аналізуються двотаври зі стінками різної висоти для пошуку перерізу з мінімально можливою погонною масою. Критерієм вибору раціональної висоти є отримання мінімальної площі перерізу, як це показано на рисунку 1, або досягнення достатньої жорсткості, як показано на рисунку 2 на прикладі балок прольотом 24 м, виконаних зі сталі з розрахунковим опором 240 МПа при різних погонних навантаженнях.

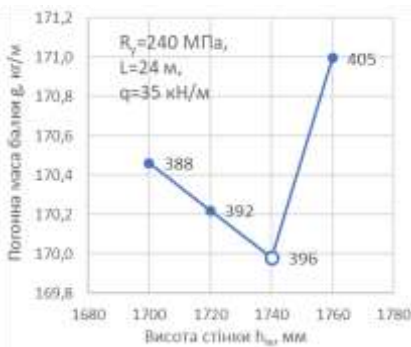


Рис. 1. Вибір висоти балки за мінімальною площею перерізу

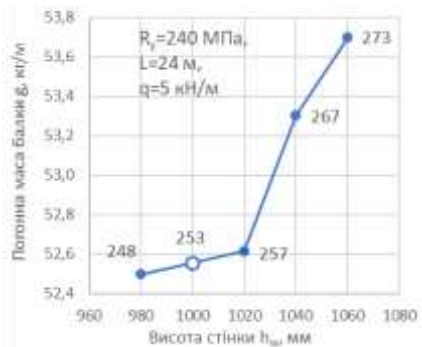


Рис. 2. Вибір висоти балки за критерієм жорсткості

Поряд з крапками, що відповідають проаналізованим перерізам з різною висотою стінки, на рисунках вказані значення критерію жорсткості L/f . Остаточні обрані перерізи позначені великими крапками. Рисунок 1 показує, що при погонному навантаженні $q = 35$ кН/м раціональна висота стінки $h_w = 1740$ мм обрана за критерієм мінімальних витрат сталі на балку при значному запасі жорсткості $L/f = 396 > [L/f] = 250$ згідно з [13]. При навантаженні $q = 5$ кН/м раціональна висота стінки $h_w = 1000$ мм обрана за критерієм жорсткості, оскільки при меншій висоті $h_w = 980$ мм отримано $L/f = 248 < [L/f] = 250$. При цьому коефіцієнт використання міцності підбраного перерізу становить $0,963 \approx 1$. З рисунка 1 та з аналізу результатів розрахунку інших балок можна зробити висновок, що

залежність витрат сталі від висоти в зоні оптимуму є досить пологою, тобто незначна зміна висоти балки неістотно впливає на витрати сталі.

Результати підбору перерізів показали, що за критерієм мінімальних витрат сталі підбрано 46 перерізів, 28 перерізів підбрані за критерієм жорсткості при повному використанні міцності, а переріз однієї балки прольотом 12 м під навантаження 5 кН/м підібраний конструктивно при значному недонапруженні. Кількість перерізів, підібраних за критерієм жорсткості, зростає при зменшенні навантаження, а також при збільшенні прольоту та розрахункового опору сталі.

Результати та обговорення

Результати підбору 75 перерізів дозволили встановити й описати апроксимуючими аналітичними виразами залежності раціональних характеристик балок з гнучкою стінкою від початкових параметрів. На рисунках 3 і 4 відображені залежності отриманої в результаті проектування раціональної висоти балок від оптимальної та мінімальної висоти, попередньо обчислених за відомими формулами з [1]. З рисунка 3 видно, що раціональна висота практично в усіх випадках отримана більшою від оптимальної висоти за [1], показаної суцільною лінією. Рисунок 4 вказує на те, що остаточно отримана раціональна висота може бути меншою від мінімальної висоти за [1]. Отримані залежності вказують на необхідність коригування формул [1] для обчислення мінімальної та оптимальної висоти балок з гнучкою стінкою.

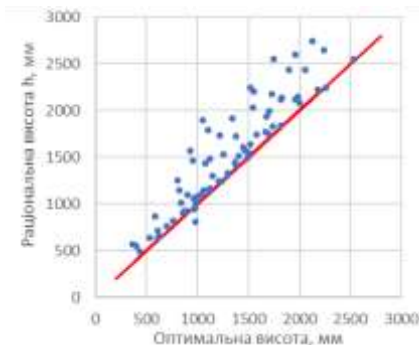


Рис. 3. Залежність раціональної висоти балки від оптимальної

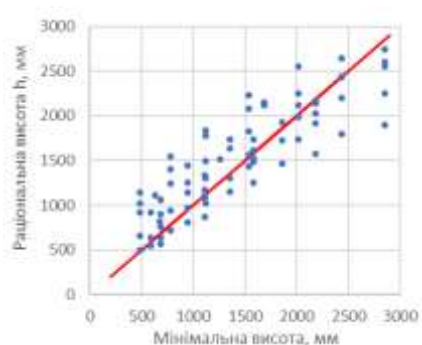


Рис. 4. Залежність раціональної висоти балки від мінімальної

Отримані результати експериментального проектування дозволили також встановити залежності раціональної висоти h , відповідної умовної гнучкості стінки $\bar{\lambda}_w$ та погонної маси балок з гнучкою стінкою g від

прольоту L , граничного розрахункового значення погонного навантаження q та розрахункового опору сталі R_y . Залежності від трьох змінних мають досить складний характер і потребують апроксимації надто складними формулами, мало придатними для практичного використання. Тому нижче отримані окремі апроксимуючі вирази для опису залежностей раціональних характеристик балок від їх прольоту L та граничного розрахункового значення погонного навантаження q для кожного з трьох проаналізованих розрахункових опорів сталі $R_y = 240, 290$ і 340 МПа.

Залежності раціональної висоти перерізу балок від їх прольоту l навантаження, отримані в результаті експериментального проектування з гнучкою стінкою, наведені в таблиці 1. З таблиці видно, що раціональна висота перерізу балок зростає при збільшенні прольоту l навантаження на балку. Збільшення розрахункового опору сталі призводить до зменшення висоти балок з малими прольотами l й великими навантаженнями та навпаки – обумовлює зростання висоти при великих прольотах l й малих навантаженнях на балку, коли перерізи підбираються переважно за критерієм жорсткості. Такі балки відмічені в таблиці 1 жирним шрифтом.

Таблиця 1. Раціональна висота балок за результатами проектування

R_y , МПа	q , кН/м	Раціональна висота балок h у мм при прольотах L , м					Коефіцієнти формули (1)	
		12	18	24	30	36		
240	5	492	714	1016	1436	1736	A =	16,6
	15	658	944	1308	1568	1992	B =	49,3
	25	924	1244	1492	1832	2120	C =	0,16
	35	1022	1408	1772	2080	2248	D =	-209
	45	1144	1548	1840	2228	2556		
290	5	548	814	1152	1462	1794	A =	10,1
	15	640	968	1304	1724	2204	B =	52,9
	25	824	1140	1512	1932	2432	C =	0,28
	35	924	1248	1640	2120	2440	D =	-181
	45	1108	1448	1740	2148	2648		
340	5	568	870	1252	1572	1896	A =	7,6
	15	636	1098	1480	1920	2248	B =	59,2
	25	760	1084	1528	2028	2552	C =	0,25
	35	904	1168	1612	2172	2600	D =	-217
	45	1064	1332	1740	2140	2748		

Залежності раціональної висоти h від прольоту L та погонного навантаження на балку q для кожного з розрахункових опорів сталі описані аналітичними виразами:

$$h = A \cdot q + B \cdot L + C \cdot q \cdot L + D, \quad (1)$$

коефіцієнти яких А, В, С, D обчислені методом найменших квадратів і наведені в останньому стовпці таблиці 1. Похибки апроксимації дослідних даних з таблиці 1 формулою (1) перебувають у межах $-8,8\% \dots +8,9\%$.

Умовні гнучкості стінок раціонально підібраних перерізів балок наведені в таблиці 2. З таблиці видно, що умовні гнучкості стінок у балках з раціонально підібраними перерізами загалом зростають при збільшенні прольоту й навантаження на балки, але при цьому мають значні випадкові коливання відносно цієї тенденції. Це можна пояснити значною дискретністю значень товщини стінки, яка змінюється в межах від 4 мм до 9 мм з кроком 1 мм, тобто на $10 \dots 20\%$. Істотне зростання умовної гнучкості від навантаження спостерігається при малих прольотах балок, а при великих прольотах ця залежність є менш вираженою.

Таблиця 2. Умовна гнучкість стінок за результатами проектування

R _y , МПа	q, кН/м	Раціональна умовна гнучкість стінки $\bar{\lambda}_w$ при прольотах L, м					Коефіцієнти формули (2)	
		12	18	24	30	36		
240	5	4,1	6,0	8,5	12,1	11,7	A =	-8,79
	15	5,5	7,9	10,9	10,5	11,2	B =	3,53
	25	7,7	10,4	10,0	10,2	10,1	C =	0,238
	35	8,5	9,4	9,9	11,6	10,7	D =	-0,008
	45	7,6	10,4	10,2	10,6	10,7		
290	5	5,1	7,5	10,7	9,1	11,1	A =	-5,10
	15	5,8	8,8	9,6	10,6	11,7	B =	2,81
	25	7,5	10,3	11,1	11,9	12,9	C =	0,165
	35	8,4	9,0	10,0	11,1	11,3	D =	-0,004
	45	10,1	10,5	10,6	11,3	12,2		
340	5	5,7	8,7	12,6	12,7	12,7	A =	-7,43
	15	6,3	11,0	11,9	12,9	12,9	B =	3,68
	25	7,5	8,6	10,2	11,6	12,8	C =	0,181
	35	8,9	9,3	10,7	12,4	11,6	D =	-0,007
	45	10,6	10,6	11,5	10,7	12,2		

Наведені в таблиці 2 залежності раціональної умовної гнучкості стінки $\bar{\lambda}_w$ від прольоту L та погонного навантаження на балку q для кожного з розрахункових опорів сталі описані аналітичним виразом:

$$\bar{\lambda}_w = A + B \cdot \sqrt{L} + C \cdot q + D \cdot q \cdot L, \quad (2)$$

Визначені за методом найменших квадратів і наведені в таблиці 2 коефіцієнти формули (2) забезпечують похибки апроксимації в межах $-18,0\% \dots +16,0\%$. Такі похибки загалом відповідають кроку дискретності товщини стінки, а тому їх можна вважати прийнятними.

Погонна маса балок з гнучкою стінкою, отримана в результаті експериментального проектування, включає масу підбраного перерізу двотавра та парних поперечних ребер жорсткості, встановлених відповідно до вимог ДБН [10]. Залежності погонної маси балок з гнучкою стінкою g в кг/м від їх прольоту L та погонного навантаження q наведені в таблиці 3. Маса запроєктованих балок систематично зростає при збільшенні їх прольоту й навантаження. Збільшення розрахункового опору сталі зазвичай обумовлює зменшення металоемності балок, але в окремих випадках, відмічених у таблиці 3 жирним шрифтом, витрати сталі зростають. Це спостерігається при великих прольотах і малих навантаженнях, коли перерізи балок підбиралися за критерієм жорсткості. У середньому балки зі сталі з розрахунковим опором $R_y = 290 \text{ МПа}$ отримані на 5%, а зі сталі з $R_y = 340 \text{ МПа}$ на 9% легшими від балок зі сталі з розрахунковим опором $R_y = 240 \text{ МПа}$. Ефект від використання більш міцної сталі зростає при малих прольотах і великих навантаженнях.

Таблиця 3. Погонна маса балок за результатами проектування

R_y , МПа	q , кН/м	Погонна маса балок g у кг/м при прольотах L , м					Коефіцієнти формули (3)	
		12	18	24	30	36		
240	5	24	38	53	73	95	A =	1,040
	15	45	69	98	128	169	B =	0,007
	25	59	92	134	180	233	C =	-8,1
	35	71	116	170	218	282		
	45	88	134	197	264	330		
290	5	22	36	52	83	104	A =	0,790
	15	41	62	93	129	175	B =	0,014
	25	55	82	122	167	220	C =	-5,7
	35	66	106	157	211	271		
	45	76	122	178	241	313		
340	5	20	36	51	77	107	A =	0,578
	15	38	58	90	129	171	B =	0,020
	25	50	82	121	170	230	C =	-1,9
	35	61	98	144	201	276		
	45	70	112	164	235	311		

Наведені в таблиці 3 залежності погонної маси балок g від прольоту L та погонного навантаження на балку q для кожного з розрахункових опорів сталі описані аналітичним виразом:

$$g = (A \cdot L + B \cdot L^2) \cdot \sqrt{q} + C, \quad (3)$$

вид якого обґрунтований у роботі [14] для прокатних і зварних балок, а також балок з перфорованими стінками. Формула (3) з коефіцієнтами, визначеними методом найменших квадратів і наведеними в таблиці 3, забезпечує похибки апроксимації в межах $-9,2\% \dots +9,9\%$.

Порівняння з даними дослідження [14] показало, що в межах проаналізованих прольотів і навантажень металоємність балок з гнучкою стінкою у середньому на 49% менша від металоємності прокатних балок, на 32% – менша від звичайних зварних балок і на 28% менша від витрат сталі на балки з перфорованою стінкою. В усіх випадках ефективність балок з гнучкою стінкою зростає при збільшенні прольоту та зменшенні навантаження.

Формули (1)...(3) дозволяють попередньо обрати раціональні значення висоти перерізу й умовної гнучкості стінки, а також орієнтовно спрогнозувати витрати сталі на балку.

Висновки

Виконане експериментальне проектування балок з гнучкою стінкою зі сталей з розрахунковим опором 240...340 МПа при прольотах 12...36 м під навантаження 5...45 кН/м. Для кожної з 75 комбінацій вказаних параметрів підібрано раціональний переріз за критерієм мінімальної металоємності (60% перерізів при малих прольотах і великих навантаженнях) або достатньої жорсткості при повному використанні міцності (40% перерізів). Кількість перерізів, підібраних за критерієм жорсткості, збільшується з ростом розрахункового опору сталі, що вказує на недоцільність використання сталей підвищеної міцності в балках з гнучкою стінкою.

Встановлено, що раціональна висота перерізу, умовна гнучкість стінки та погонна маса балок збільшуються при зростанні прольоту й навантаження на балку. Отримані в результаті експериментального проектування табличні залежності цих характеристик від прольоту й навантаження описані аналітичними виразами, рекомендованими для попереднього оцінювання раціональної висоти балок, умовної гнучкості стінки та витрат сталі на балку. Використання цих залежностей дозволить обирати раціональні перерізи балок з гнучкими стінками, які при мінімально можливих витратах сталі відповідають вимогам чинних норм проектування сталевих конструкцій.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Nilov O.O., Permiakov V.O., Shymanovskyi O.V. ta in. *Metalevi konstruktsii: Zahalnyi kurs: Pidruchnyk dlia vyshchyykh navchalnykh zakladiv*. Vydannia 2-e, pererobl. i dopovn. K.: Vydavnytstvo "Stal", 2010, 869 s.

2. Tsarynnyk Yu.Iu. *Metalevi konstruktsii. Spetskurs: Navchalnyi posibnyk*. Lviv: Vydavnytstvo "Beskyd Bit", 2004. – 304 s.

3. Bilyk S.I., Skliarov I.O. *Rozvytok teorii rozrakhunku ta proektuvannia ramnykh karkasiv zminnoho dvotavrovoho pererizu z hnuchkoiu stinkoiu*. Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia, 2010. Vyp. 38, 48-56. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2010_38_10

4. Skliarov I.O. *Perspektyvy rozvytku ramnykh karkasiv zi zvarnykh dvotavriv iz hnuchkoiu stinkoiu*. Chernihivskiyi naukovyi chasopys. Seriya 2, Tekhnika i pryroda. № 2 (2), 2011, 128-133. <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/f624f56e-3ca9-4f74-ac28-116ea9ce2f4d/content>

5. Shebanin V.S., Shebanina L.P., Bohza V.H. *Rozrakhunok stalevykh karkasiv z universalnykh elementiv zminnoho pererizu z hnuchkoiu stinkoiu*. Visnyk ahrarnoi nauky Prychornomoria, Vypusk 3 (73), 2013, 180-185. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/994/1/n73v3r2013shebanin.pdf>

6. Hudz S.A. *Rozrakhunok tonkostinnykh stalevykh balok na sumisnu diu poperechnoho zghynu i kruchennia z urakhuvanniam ohorodzhuvalnykh konstruktsii*. Sovremennye stroytelnye konstruktsyy yz metalla y drevesyny, ch. 1., Odessa: OHASA, 2008, 48 – 53. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/974>

7. Silva, Luis. (1999). Comparative Assessment of the Shear Strength of Slender Steel Beams. *Archives of Civil Engineering*. 45. 587-613. https://www.researchgate.net/publication/258833161_Comparative_Assessment_of_the_Shear_Strength_of_Slender_Steel_Beams

8. Martins Calisto, Caroline & Castro e Silva, Ana Lydia & Caldas, Rodrigo & Carvalho, Hermes. (2023). Numerical Model for Analysis of Compact and Slender Hybrid Steel Beams Subjected to Bending. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 20. 1-18. e490. <https://doi.org/10.1590/1679-78257411>.

9. El Aghoury, Ihab & Ibrahim, Mohamed & Ibrahim, Sherif. (2020). Experimental and numerical investigation of ultimate shear strength of unstiffened slender web-tapered steel members. *Journal of Constructional Steel Research*. 148. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106601>.
10. DBN V.2.6-198:2014. *Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia*. Zi zminoiu № 1. K., 2022. – 220 s.
11. DBN V.1.2-2:2006. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia*. Zi zminoiu № 1 i №2. K.: Minbud Ukrainy, 2020. – 68 s.
12. DBN V.1.2-14-2018. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsyzy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel i sporud*. Iz zminoiu №1. K., 2022, 35 s.
13. DSTU B V.1.2-3:2006. *Prohyny i peremishchennia. Vymohy proektuvannia*. K.: Minbud Ukrainy, 2006, 9 s.
14. Pashynskiy V.A., Skrynnik I.O., Kharchenko I.V., Khachaturian S.L. Vahovi kharakterystyky ta oblasti ratsionalnoho vykorystannia stalevykh balok u budivliakh ta konstruktsiiah vantazhopidomnykh mashyn. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. Vyp. 1(32)*. Kropyvnytskyi: TsNTU. 2019, 228-235.. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/1\(32\)/28.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/1(32)/28.pdf)

Література

1. Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В. та ін. *Металеві конструкції. Загальний курс: Підручник для вищих навчальних закладів. Видання 2-е, переробл. і доповн.* К.: Видавництво "Сталь", 2010, 869 с.
2. Царинник Ю.Ю. *Металеві конструкції. Спецкурс: Навчальний посібник*. Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2004. – 304 с.
3. Білик С.І., Склярів І.О. Розвиток теорії розрахунку та проектування рамних каркасів змінного двотаврового перерізу з гнучкою стінкою. *Містобудування та територіальне планування*, 2010. Вип. 38, 48-56. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2010_38_10
4. Склярів І.О. Перспективи розвитку рамних каркасів зі зварних двотаврів із гнучкою стінкою. *Чернігівський науковий часопис. Серія 2, Техніка і природа*. № 2 (2), 2011, 128-133. <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/f624f56e-3ca9-4f74-ac28-116ea9ce2f4d/content>
5. Шебанін В.С., Шебаніна Л.П., Богза В.Г. Розрахунок сталевих каркасів з універсальних елементів змінного перерізу з гнучкою стінкою. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, Випуск 3 (73), 2013, 180-185. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/994/1/n73v3r2013shebanin.pdf>
6. Гудзь С.А. Розрахунок тонкостінних сталевих балок на сумісну дію поперечного згину і кручення з урахуванням огорожувальних конструкцій. *Современные строительные конструкции из металла и древесины, ч. 1.*, Одесса: ОГАСА, 2008, 48 – 53. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/974>
7. Silva, Luís. (1999). Comparative Assessment of the Shear Strength of Slender Steel Beams. *Archives of Civil Engineering*. 45. 587-613. https://www.researchgate.net/publication/258833161_Comparative_Assessment_of_the_Shear_Strength_of_Slender_Steel_Beams

8. Martins Calisto, Caroline & Castro e Silva, Ana Lydia & Caldas, Rodrigo & Carvalho, Hermes. (2023). Numerical Model for Analysis of Compact and Slender Hybrid Steel Beams Subjected to Bending. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 20. 1-18. e490. <https://doi.org/10.1590/1679-78257411>.

9. El Aghoury, Ihab & Ibrahim, Mohamed & Ibrahim, Sherif. (2020). Experimental and numerical investigation of ultimate shear strength of unstiffened slender web-tapered steel members. *Journal of Constructional Steel Research*. 148. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106601>.

10. ДБН В.2.6-198:2014. *Сталеві конструкції. Норми проектування*. Зі зміною № 1. К., 2022. – 220 с.

11. ДБН В.1.2-2:2006. *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування*. Зі зміною №1 і №2. К.: Мінбуд України, 2020. – 68 с.

12. ДБН В.1.2-14:2018. *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд*. Із зміною №1. К., 2022, 35 с.

13. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. *Прогини і переміщення. Вимоги проектування*. К.: Мінбуд України, 2006, 9 с.

14. Пашинський В.А., Скриннік І.О., Харченко І.В., Хачатурян С.Л. Вагові характеристики та області раціонального використання сталевих балок у будівлях та конструкціях вантажопідійомних машин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Вип. 1(32). Кропивницький: ЦНТУ. 2019, 228-235. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/1\(32\)/28.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/1(32)/28.pdf)

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.12.2025	Received 14.12.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.04.2026	Received in revised form 23.04.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

V. A. Pashynskyi

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-6399>

Department of Building, Road Machines and Construction

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Universytetskyi ave., 8, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006

M. V. Pashynskyi

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-523X>

Department of Building, Road Machines and Construction

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Universytetskyi ave., 8, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006

*corresponding author, e-mail: pva.kntu@gmail.com

Analysis of design parameters and weight characteristics of steel beams with flexible web

How to Cite:

Pashynskyi, V. A., Pashynskyi, M. V. (2026). Analysis of design parameters and weight characteristics of steel beams with flexible web. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 5-17. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-01)

Abstract. The article presents the results of the analysis of the cross-sectional parameters and weight characteristics of steel beams with a flexible web. By experimentally designing beams with spans of 12...36 m under a load of 5...45 kN/m, the dependence of the rational cross-sectional height, conditional web flexibility and linear mass of beams on their span, linear load and design steel resistance were obtained and described by simple approximating expressions.

The calculations were performed using a calculation form developed in Microsoft Excel, which allows to select an I-beam cross-section with the minimum possible mass under the conditions of fulfilling the design requirements for beams with a flexible web, established by DBN V.2.6-198:2014 "Steel Structures". 75 I-beams were analyzed (5 values of span and load and 3 values of design steel resistance). For each combination of span and load, the rational web height is selected from several heights according to the criterion of the minimum linear mass of the I-beam or according to the stiffness criterion.

It has been established that the rational cross-section height, conditional web flexibility and metal content of I-beams generally increase with increasing span and linear load. An increase in the design steel resistance leads to a decrease in the height and metal content of beams of small spans under large loads, but can cause an increase in the height and metal content at large spans and small loads, when the stiffness criterion is decisive. This calls into question the feasibility of using high-strength steels for the manufacture of I-beams with flexible web.

The obtained dependencies allow to select the height and conditional web flexibility based on the given values of the span, linear load and design steel resistance, which ensure the selection of a rational cross-section of an I-beam with a flexible web, as well as to preliminarily estimate its metal content.

Keywords: beams with flexible web, rational beam height, conditional web flexibility, metal consumption.

УДК624.9

А. С. Величкович

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019

А. В. Андрусяк*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019

Ю. В. Олевич

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-9945>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019

*автор-кореспондент, e-mail: andrii.andrusiak@nung.edu.ua

Експрес-оцінка вибухостійкості шаруватих пластин для захисних екранів і облицювань

Цитувати як:

Величкович А. С., Андрусяк А. В., Олевич Ю. В. (2026). Експрес-оцінка вибухостійкості шаруватих пластин для захисних екранів і облицювань. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 18-34. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-02)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У будівництві та суміжних інженерних галузях зростає потреба в захисних екранах і облицюваннях, здатних ефективно працювати під дією вибухових навантажень. У статті представлено експрес-методику оцінки вибухостійкості захисних шаруватих пластин для проєктування таких конструктивних елементів. Методика орієнтована на етап ескізного вибору, коли необхідно швидко зіставити варіанти шарування за обмежень поверхневої маси та габаритів і обґрунтувати стартове конструктивне рішення. Розрахункову модель побудовано на основі лінійної теорії пластин Кірхгофа–Лява, а вибуховий вплив подано еквівалентним короткоімпульсним навантаженням, узагальнювальною характеристикою якого є інтегральна міра імпульсу. Первинну працездатність оцінюють за двома критеріями. Максимальний прогин характеризує глобальну деформативність і безпосередньо пов'язаний із функціональними вимогами, зокрема з допустимим зазором до об'єкта захисту. Мінімальний коефіцієнт запасу за допустимими напруженнями визначає критичний шар і задає напрям коригування компоновки. Методику подано як послідовний розрахунковий алгоритм, що дозволяє варіювати товщини, матеріали та порядок шарів і отримувати конструктивне рішення в інженерно

інтерпретованій формі. Основні тестові результати подано як серію порівняльних і параметричних розрахунків для трьох конструкцій захисних пластин, в тому числі для легкого композитного сендвіча як прикладу альтернативного класу рішень із малою поверхневою масою. Для двох поширених компоновок, металополімерної та кераміко-еластомерної, отримано співвідношення “поверхнева маса–прогин” і “поверхнева маса–запас міцності”. Показано, що товщина середнього демпферного прошарку переважно визначає деформативність за помірною приросту маси, тоді як потовщення лицьової обшивки швидко збільшує запас міцності. Отримані результати підтверджують доцільність експрес-оцінки як інструмента для прийняття первинного конструктивного рішення і підготовки обґрунтованої базової моделі для подальшого уточнення у скінченно-елементній постановці.

Ключові слова: вибухостійкість, шаруваті пластини, захисні облицювання, імпульсне навантаження, теорія Кірхгофа–Лява, прогин, напруження, коефіцієнт запasu, поверхнева маса.

Вступ

Захисні шаруваті пластини застосовують там, де потрібне надійне та економне за масою рішення проти короткочасних екстремальних впливів. Типовими прикладами є захисні днища та екрани техніки, протиуламкові і протиударні панелі, локальні захисні вставки в огорожувальних конструкціях, підсилені перегородки та бар’єрні елементи тощо. У таких задачах визначальною є стійкість захисного елемента до дії надмірного тиску повітряної ударної хвилі.

На етапі концепції та попереднього проектування інженеру потрібна швидка відповідь на низку практичних запитань: яка компоновка шарів (матеріали, послідовність, товщини) дає менші прогини та напруження за однакової питомої маси, та в якому напрямку змінювати параметри, щоб досягти прийняттого рівня пошкоджуваності без надмірного збільшення маси чи габаритів. Така експрес-оцінка допомагає прийняти первинне конструктивне рішення, яке надалі можна детально перевірити в розрахункових програмних пакетах методом скінченних елементів.

Під вибухостійкістю надалі розумітимемо здатність елемента зберігати несучу та захисну функції під дією вибухового навантаження та обмежувати деформації і пошкодження до прийняттого рівня. Саме для первинної, параметричної та швидкої оцінки і пропонується підхід, орієнтований на інженерну практику вибору конструктивної схеми захисних облицювань і екранів.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Сучасні дослідження вибухостійкості тонкостінних і шаруватих елементів розвиваються переважно у двох напрямках: експериментально-числове вивчення конкретних конфігурацій панелей; пошук ефективних архітектур

шарів, які підвищують енергоємність і зменшують пікові деформації [1–3]. Зокрема, для сендвіч-пластин із пінометалевими осердями показано характерні моди деформування та руйнування під дією повітряного вибуху, а також чутливість прогину до імпульсу навантаження [1]. Як окремий шлях підвищення вибухостійкості конструкцій активно вивчаються та оптимізуються ауксетичні стільникові осердя [4, 5].

Серія оригінальних робіт присвячена динаміці пластин за умов коротких і надкоротких імпульсів, зокрема ефектам «насичення імпульсу» для металевих пластин у замкненому вибуховому середовищі [6]. Також розглядається поведінка сендвіч-панелей зі спеціально спроектованими або градієнтними осердями та застосуванням адитивних технологій виготовлення [7, 8]. До цього ж напрямку слід віднести роботи, присвячені згину пластин із тріщинами та системами розрізів з урахуванням контактної взаємодії берегів [9–11]. У роботі [12] для вибухостійких конструкцій реалізовано комплексний підхід, у якому метод скінченних елементів використано для формування динамічної відповіді сендвіч-панелей, а моделі машинного навчання – для багатокритеріальної оптимізації геометрії осердя.

Водночас у будівельній та суміжній інженерії значний інтерес викликають рішення типу захисне облицювання чи екран, які приймають на себе частину енергії вибуху та знижують пошкодження основної несучої конструкції [13, 14]. Для залізобетонних елементів додатково розглядають композитні системи з полімерними покриттями як механізм підвищення енергодисипації та тріщиностійкості при тривалих імпульсах [15]. Для спеціальних високоміцних матеріалів, зокрема ультрависокоміцного фібробетону, наведено робочі діапазони міцності та деформативності за вибухових впливів [16]. На рівні прийняття конструктивних рішень (перекриття, балки чи ферми, відкриті решітчасті елементи) зростає кількість робіт із детальним моделюванням близьких вибухів і складних випадків взаємодії "повітря–конструкція" [17].

Попри суттєвий прогрес, у практичному проєктуванні залишається прогалина, що пов'язана з первинним конструктивним рішенням. Інженеру-практику потрібна швидка методика вибору шаруватої пластини (матеріалів, товщин, послідовності шарів) з оцінкою максимального прогину та напружень у кожному шарі. Це дає змогу ще до трудомісткого налаштування нелінійної скінченно-елементної моделі отримати надійні орієнтири для подальшого детального аналізу. Для будівельного контексту також важливо, щоб первинна експрес-оцінка узгоджувалась із розрахунками на аварійні (випадкові) дії та концепцією надійності і конструктивної безпеки за чинними нормами [18, 19]. Аналіз показує, що більшість сучасних публікацій або зосереджується на високоточному

розрахунку конкретної конструкції для заданого сценарію, або розв'язує оптимізаційні задачі для окремих класів осердь чи метаструктур. Водночас такі результати малоприслужні для ескізного проектування захисних облицювань і екранів, де потрібна коротка інженерна процедура для швидкого порівняння варіантів. Це підводить до постановки проблеми: потрібно розробити уніфікований та відтворюваний аналітичний модуль для первинних оцінок деформативності і міцності шаруватої пластини за впливу вибухової хвилі.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження – розробити та обґрунтувати інженерний підхід до експрес-оцінки вибухостійкості шаруватих пластин як елементів захисних облицювань і екранів на основі простої аналітичної схеми (із орієнтацією на швидкий параметричний аналіз та порівняння варіантів).

Для досягнення мети потрібно виконати аналітичне моделювання шаруватої прямокутної пластини за дії еквівалентного імпульсного вибухового тиску, розробити узагальнену процедуру оцінювання максимального прогину та напружень у шарах, реалізувати параметричний аналіз матеріалів, товщин і послідовності шарів з урахуванням заданих геометричних обмежень і допустимої маси шаруватої пластини.

Матеріали та методи

Розрахункова модель та прийняті припущення. Об'єктом моделювання є прямокутна шарувата пластинка з розмірами $a \times b$ (завжди прийматимемо $a \geq b$), шарнірно обіперта по всьому контуру (рис. 1). Для опису деформування використано модель пластини Кірхгофа–Лява.

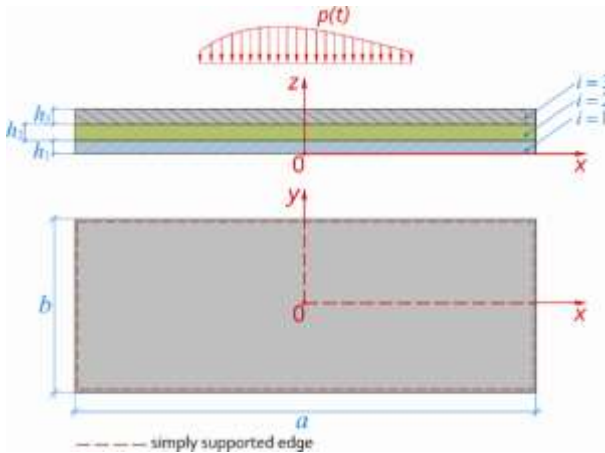


Рис. 1. Розрахункова схема захисної шаруватої пластини

Вводимо декартову систему координат: вісь (x) уздовж розміру (a), вісь (y) уздовж розміру (b), вісь (z) – по товщині шаруватої пластини вгору. Початок координат розташовуємо в центрі нижньої поверхні пластини, тобто $x \in [-a/2, a/2]$, $y \in [-b/2, b/2]$, $z \in [0, H]$, де (H) – сумарна товщина.

Пластина може містити n ізотропних шарів (у базовій моделі прийемо від 1 до 3 шарів). Геометрія та механічні характеристики кожного шару задаються товщиною h_i , модулем Юнга E_i , коефіцієнтом Пуассона ν_i , густиною ρ_i та допустимим напруженням $[\sigma]_i$. Шари вважаються такими, що працюють сумісно (без відриву та ковзання по межі шарів). Це відповідає типовому виконанню композитних захисних панелей коли шари стягуються по контуру в рамі, з'єднуються болтами чи заклепками, точковими фіксаторами або компаундним шаром.

Модель вибухового впливу та короткоімпульсний режим. Зовнішній вплив моделюється як короткоімпульсний вибуховий тиск, що діє рівномірно по площі пластини:

$$p(t) = p_{\max}, t \in [0, \Delta t], \quad (1)$$

де p_{\max} – піковий тиск, Δt – ефективна тривалість імпульсу.

Інтегральну міру “поштовху”, спричинену вибухом, задаємо прямокутним імпульсом тиску:

$$i_p = \int_0^{\Delta t} p(t) dt = p_{\max} \Delta t \cdot \quad (2)$$

У межах експрес-моделі розглядається короткоімпульсний режим, коли реакція конструкції визначається імпульсом навантаження та першою формою коливань. Такий режим є типовим для більшості задач повітряної ударної хвилі. У випадках коли короткоімпульсність не виконується, експрес-методика дає верхню (консервативну) оцінку вибухостійкості, оскільки прямокутний імпульс перевищує реальний імпульс спадної вибухової хвилі. Для інженерної оцінки p_{\max} та Δt можна визначати за тротиловим еквівалентом і відстанню до центра вибуху, використовуючи методика Kingery–Bulmash, або спрощені методики [20].

Еквівалентні згинальні характеристики шаруватої пластини. Щоб розглянути згин “пакета шарів”, визначимо положення нейтральної осі для неоднорідного по товщині перерізу в межах лінійної теорії ламінатів. Нейтральна вісь (нейтральна поверхня) обирається так, щоб при чистому згині сумарна мембранна складова напружень по товщині дорівнювала нулю:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i}{1 - \nu_i^2} \right) h_i z_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i}{1 - \nu_i^2} \right) h_i}, \quad (3)$$

де z_i – координата центра ваги i -го шару.

Тоді, еквівалентна згинальна жорсткість

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{1 - \nu_i^2} \left(\frac{h_i^3}{12} + h_i (z_i - z_0)^2 \right), \quad (4)$$

тут $h_i^3 / 12$ – власний погонний момент інерції i -го шару відносно його центру (характеризує власну жорсткість шару),

$h_i (z_i - z_0)^2$ – доданок, визначений за теоремою Гюйгенса-Штейнера (характеризує підсилення за рахунок винесення жорстких шарів відносно нейтральної осі),

$E_i / (1 - \nu_i^2)$ – “плитний” модуль для i -го шару (враховує ефект Пуассона у зв’язку між кривинами та згинальними моментами).

Інерційна складова описується масою, що припадає на одиницю площі:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i. \quad (5)$$

По суті пара параметрів D та μ є визначальною у поставленій задачі: D – керує пружністю системи, а μ – її інерційним опором.

Визначення максимального прогину шаруватої пластини.

Динамічну реакцію пластини оцінено через модальний підхід, де поле прогинів представляється суперпозицією власних форм. Для моделі (рис. 1) власні форми φ_{mn} та власні частоти записуються як:

$$\varphi_{mn}(x, y) = \sin\left(\frac{m\pi}{a}\left(x + \frac{a}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}\left(y + \frac{b}{2}\right)\right), \quad (6)$$

$$\omega_{mn} = \pi^2 \left(\frac{m}{a^2} + \frac{n}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\mu}}. \quad (7)$$

У межах експрес-оцінки свідомо використовується одномодове наближення (перша форма, $m = n = 1$), оскільки в короткоімпульсному

режимі саме перша форма визначає амплітуду глобального згину захисної панелі та пов'язану з ним працездатність за прогином.

У короткоімпульсному режимі тиск задає шаруватій пластині “поштовх”, тобто формує початкову швидкість вільних коливань. При цьому амплітуда – максимальний прогин пластини визначається як $w_{\max} = \dot{w}(0+)/\omega_{11}$, де початкова швидкість $\dot{w}(0+) = \zeta i_p / \mu$, а

модальний коефіцієнт $\zeta = 16/\pi^2$. Остаточо, максимальний прогин:

$$w_{\max} = \frac{16 p_{\max} \Delta t}{\pi^2 \mu \omega_{11}}. \quad (8)$$

Цей вираз одразу вказує напрями параметричного проектування: прогин зростає з імпульсом $p_{\max} \Delta t$, зменшується з ростом μ та ω_{11} . У свою чергу власна частота ω_{11} зростає зі збільшенням жорсткості D і зі зменшенням прогонів a та b .

Оцінка міцності шаруватої пластини. Для переходу від прогинів до напружень використовується зв'язок через кривини серединної поверхні. Оскільки $a \geq b$, то $k_y \geq k_x$, тому достатньо обчислити одну домінуючу кривину:

$$k_y = \frac{\pi^2}{b^2} w_{\max}. \quad (9)$$

Далі напруження в кожному шарі оцінюються в крайніх волокнах, оскільки саме вони визначають небезпечні рівні при згині. Спочатку задаються координати меж шарів (координати нижніх $z_{l,i}$ і верхніх $z_{u,i}$ волокон кожного шару).

Тоді нормальні напруження в напрямку осі y в крайніх волокнах i -го шару (в нижніх волокнах $\sigma_{l,i}$; у верхніх волокнах $\sigma_{u,i}$):

$$\sigma_{l,i} = E_i k_y (z_{l,i} - z_0); \quad \sigma_{u,i} = E_i k_y (z_{u,i} - z_0). \quad (10)$$

Для перевірки міцності використовується максимальне за модулем напруження в шарі:

$$\max \sigma_i = \max (|\sigma_{l,i}|, |\sigma_{u,i}|), \quad (11)$$

а запас за допустимим напруженням визначається як

$$k_{ms,i} = [\sigma]_i / \max \sigma_i. \quad (12)$$

Узагальнена оцінка працездатності шаруватої пластини в експрес-постановці приймається за найменшим запасом серед шарів.

Результати та обговорення

Для демонстрації роботи запропонованої експрес-методики та порівняння інженерних рішень розглянуто три тришарові компоновки, характерні для захисних облицювань і екранів. Попередні оцінки на етапі підбору архітектури показали, що раціональним напрямом є схема типу "жорстка та міцна лицьова обшивка – відносно податливий прошарок – несуча підкладка", тому всі варіанти сформовано в подібній послідовності. Нижче наведено три конструкції К1–К3 шаруватих пластин, порядок шарів подано починаючи з боку дії вибухового навантаження у бік захищеної конструкції.

Варіант К1. Це металополімерна панель із жорсткою сталеву лицьову обшивку та легшою тильною підкладкою: високоміцна сталь (Армох 500Т), 6 мм – полікарбонат, 30 мм – алюмінієвий сплав 7075-Т6, 8 мм (характеристики матеріалів подано в табл. 1).

Варіант К2. Це компоновка з керамічною лицьову обшивку, еластомерним буфером і сталеву підкладкою: оксидна кераміка Al_2O_3 , 8 мм – еластомер TPU, 16 мм – високоміцна сталь, 6 мм.

Варіант К3. Це легка сендвіч-панель з композитними обшивками та пінним ядром: склопластик GFRP, 8 мм – полімерне пінне ядро, 60 мм – склопластик GFRP, 8 мм (зауважимо, що у межах експрес-оцінки використано еквівалентно-ізотропні властивості GFRP і ядра).

Геометрія в плані для всіх варіантів конструкцій К1–К3 є фіксованою: $a = 1.5\text{ м}$, $b = 1.5\text{ м}$; на першому етапі дослідження імпульс навантаження змінювався у діапазоні $i_p = 800\dots 2000\text{ Па}\cdot\text{с}$.

Таблиця 1. Характеристики матеріалів для конструювання шаруватих пластин

Матеріал (Позначення)	$E, ГПа$	ν	$\rho, кг/м^3$	$[\sigma], МПа$
Високоміцна сталь Армох 500Т (Steel)	210	0.30	7850	820
Алюмінієвий сплав 7075-Т6 (Al)	71	0.33	2810	420
Полікарбонат (PC)	2.3	0.37	1200	60
Оксидна кераміка Al_2O_3 (Ceramic)	300	0.22	3900	1500
Еластомер TPU (Elastomer)	0.02	0.49	1150	10
Склопластик (GFRP)	25	0.25	1900	360
Полімерне пінне ядро (Core)	0.12	0.30	120	5

На рис. 2 показано залежність максимального прогину шаруватої пластини від величини імпульсу. Для всіх трьох варіантів залежність є лінійною, що узгоджується з прийнятою короткоімпульсною схемою. Порівняння конструкцій у всьому діапазоні 800–2000 Па·с показує стабільний розподіл за жорсткістю чи інерційністю:

- K1 дає найменші прогини (приблизно від 11 мм при 800 Па·с до 28 мм при 2000 Па·с),
- K2 має проміжний рівень деформативності (13...33 мм),
- K3 демонструє найбільші прогини (21...53 мм), що є прогнозованим результатом для легкого сендвіча з малою поверхневою масою та піддатливим ядром.

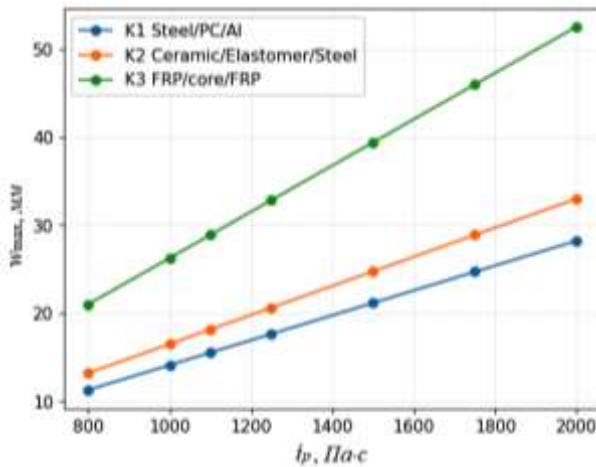


Рис. 2. Залежність максимального прогину шаруватої пластини від імпульсу вибухового навантаження

Рис. 3 демонструє залежність мінімального коефіцієнта запасу шаруватої пластини k_{ms} від імпульсу i_p . Зі зростанням i_p коефіцієнт запасу закономірно зменшується, а горизонтальна пунктирна лінія $k_{ms} = 1$ інтерпретується як поріг працездатності в експрес-оцінці. За графіком видно, що перетин із порогом відбувається в області імпульсу тиску $(1.1...1.3) \times 10^3 \text{ Па}\cdot\text{с}$. При цьому:

- K2 досягає порогу трохи раніше за інших (найменший запас у заданій серії),
- K1 близький до порогу в тій самій зоні,

– К3 зберігає запас дещо довше (перетин ближче до верхньої межі цього інтервалу), хоча за прогинами цей варіант конструкції лишається найподатливішим.

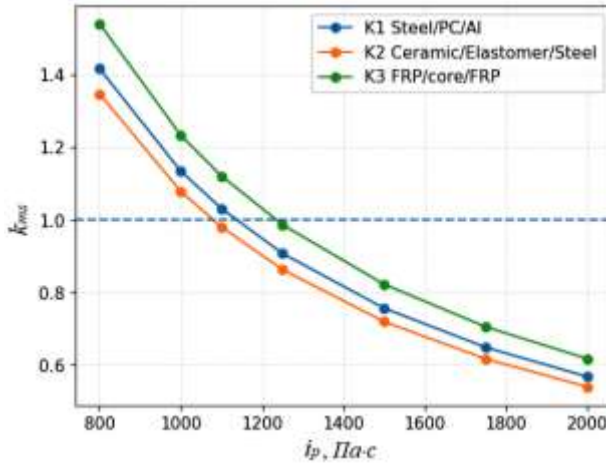


Рис. 3. Залежність мінімального коефіцієнта запасу шаруватої пластини від імпульсу вибухового навантаження

Таким чином, пара графіків рис. 2 та рис. 3 дає інженерно зручну оцінку, а саме жорсткість і деформативність (за w_{max}) та міцність і запас (за k_{ms}) у функції імпульсу, що є метою експрес-оцінки на ранній стадії проектування.

На рис. 4–5 подано результати параметричного аналізу для двох конструкцій захисних панелей К1 і К2 за фіксованих розмірів плити в плані та фіксованого (представницького) рівня імпульсного впливу. Як представницький прийнято імпульс тиску $1100 Pa \cdot s$, який лежить у середині робочого діапазону і робить порівняння максимально виразним.

Третю конструкцію К3 ми залишили лише на рис. 2–3 як репрезентативний приклад “легкого сендвіча”, щоб показати, як експрес-методика працює для іншого класу рішень із малою поверхневою масою та принципово іншою деформативністю. На рис. 4–5 варіант К3 не відображено, оскільки його масовий діапазон суттєво нижчий за К1–К2 і у спільному масштабі це призводить до поганої читабельності графіків.

У побудованих залежностях як керований параметр обрано товщину середнього, податливого шару – він є технологічно найпростішим регулятором на стадії ескізного підбору. Для конструкції К1 послідовно

збільшували товщину полікарбонатного ядра, при цьому поверхнева маса плити зростала від 91 до 120 кг/м². На цьому фоні максимальний прогин зменшувався більш ніж удвічі. Одночасно мінімальний коефіцієнт запасу за допустимими напруженнями зростав від значень трохи нижчих за одиницю до помітно більших за одиницю. Поріг запасу, рівний одиниці, досягається в околі поверхневої маси 100 кг/м².

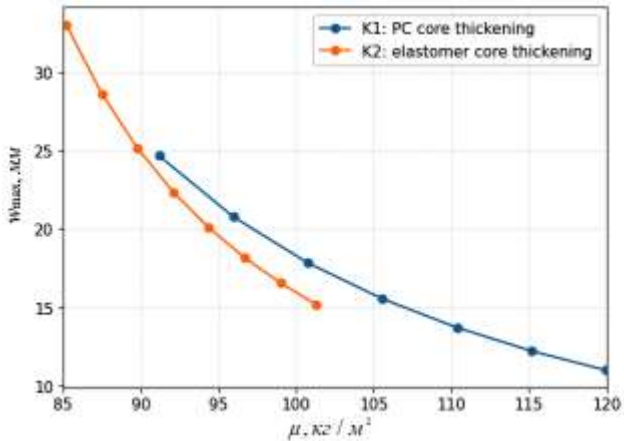


Рис. 4. Співвідношення поверхнева маса – максимальний прогин при збільшенні товщини середнього прошарку

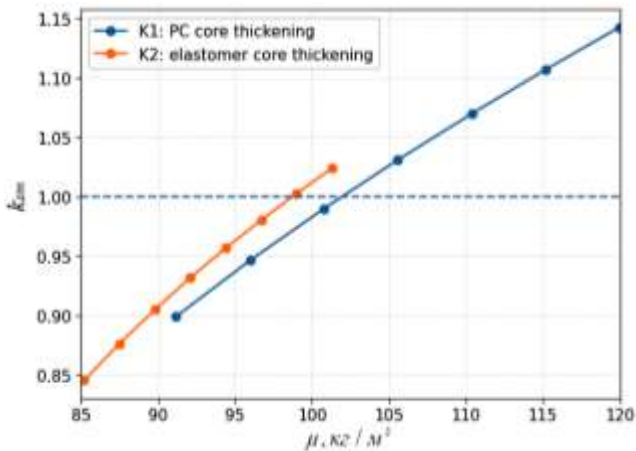


Рис. 5. Співвідношення поверхнева маса – мінімальний коефіцієнт запасу міцності при збільшенні товщини середнього прошарку

Аналогічну серію виконано для конструкції K2, де змінювали товщину еластомерного прошарку. У цьому випадку маса збільшувалася помірно, від 85 до 101 кг/м², однак ефект для деформативності також був виражений (максимальний прогин зменшувався від 33 до 15 мм). Коефіцієнт запасу при цьому зростає, а вихід у зону первинної працездатності досягається практично в тому самому інтервалі поверхневої маси – близько 100 кг/м².

Залежності на рис. 4–5 демонструють узгоджену тенденцію для обох конструкцій. Збільшення товщини середнього шару за відносно помірного приросту маси одночасно зменшує прогин і підвищує запас міцності.

На рис. 6 показано, як змінюється максимальний прогин плити залежно від поверхневої маси за умови потовщення саме лицьового шару, тоді як решта шарів у кожній конструкції залишаються незмінними. Для K1 збільшували товщину сталевий лицьовий обшивки від 4 до 11 мм, при цьому поверхнева маса зростає приблизно від 90 до 145 кг/м², а максимальний прогин зменшується з близько 19 до близько 11 мм. Для K2 товщину керамічної лицьовий обшивки змінювали в ширшому діапазоні – від 4 до 14 міліметрів, маса при цьому збільшується приблизно від 81 до 120 кг/м², а прогин знижується майже вдвічі – від 25 до близько 13 мм. Отже, потовщення лицьового шару є дієвим конструктивним прийомом зменшення деформативності, причому для керамічної обшивки ефект “жорсткість на одиницю приросту маси” проявляється особливо помітно в нижній частині масового діапазону.

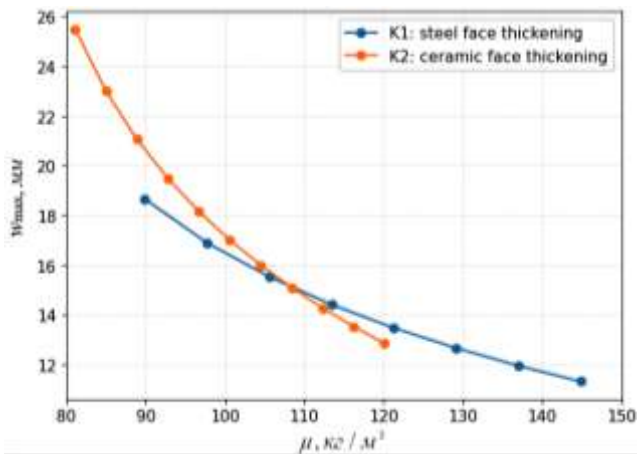


Рис. 6. Співвідношення “поверхнева маса – максимальний прогин” при збільшенні товщини лицьовий обшивки

Рис. 7 доповнює цей висновок, показуючи зміну мінімального коефіцієнта запасу міцності за допустимими напруженнями залежно від поверхневої маси при тому самому імпульсному навантаженні. Для K1 збільшення товщини сталевішої лицьовішої обшивки піднімає мінімальний запас від значень, близьких до одиниці, до впевнено більших за одиницю. Для K2 аналогічна тенденція спостерігається при потовщенні кераміки. У верхній частині діапазону, коли товщина керамічної обшивки досягає 11–14 міліметрів, криві K1 і K2 зближуються та перетинаються, що відображає близький рівень “первинної працездатності” за критерієм допустимих напружень за порівнянних значень поверхневої маси.

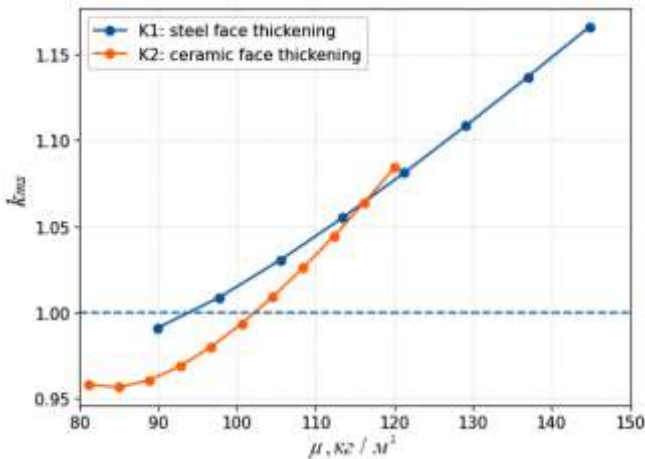


Рис. 7. Співвідношення “поверхнева маса – мінімальний коефіцієнт запасу міцності” при збільшенні товщини лицьовішої обшивки

У підсумку рис. 6–7 демонструють узгоджену картину: збільшення товщини лицьового шару одночасно зменшує прогини і підвищує запас міцності, а відносна ефективність такого підсилення визначається матеріалом лицьовішої обшивки та допустимим приростом маси конструкції.

Висновки

1. Запропоновано та апробовано інженерну експрес-методику первинної оцінки вибухостійкості шаруватих пластин для захисних облицювань і екранів, орієнтовану на ранню стадію проєктування. Методика забезпечує аналітичну оцінку динамічної відповіді на короткоімпульсний вплив і надає конструктору інструмент для первинного

підбору та швидкого порівняння варіантів без трудомісткого налаштування нелінійної скінченно-елементної моделі.

2. Показано, що максимальний прогин слід трактувати як інтегральний показник глобальної жорсткості та деформативності захисної системи при короткоімпульсному навантаженні. У практиці вибухозахисту придатність за прогином часто пов'язана з функціональною вимогою – наявним зазором до об'єкта захисту або допустимим рівнем переміщень. Надмірний прогин сигналізує про необхідність коригування архітектури шарів (товщин, матеріалів обшивок і їх розташування по товщині).

3. Для оцінки міцності в межах експрес-постановки використано максимальні нормальні напруження у шарах як характеристику небезпечного стану при згині. Порівняння цих напружень із допустимими значеннями для кожного матеріалу дає однозначний інженерний критерій первинної працездатності.

4. Запас міцності за допустимим напруженням більше одиниці означає прийнятний режим роботи шару, а значення, що дорівнює або менше одиниці, вказує на шар, який визначає потребу змінювати конструкцію. Узагальнену оцінку вибухостійкості шаруватої пластини доцільно приймати за мінімальним запасом серед шарів.

5. Практична цінність експрес-методики полягає у можливості швидкого параметричного аналізу, варіюючи товщини, матеріали, порядок шарів, геометрію плити та параметри імпульсу, інженер одразу отримує прогини, напруження, поверхневу масу та коефіцієнти запасу. Це дозволяє за короткий час відсіяти невдалі варіанти, сформувати раціональну компоновку шарів і підготувати обґрунтоване первинне конструктивне рішення.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Li Y., Ren X., Zhang X., Chen Y., Zhao T., Fang D. Deformation and failure modes of aluminum foam-cored sandwich plates under air-blast loading. *Composite Structures*. 2021. Vol. 258. P. 113317. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113317>
2. Ye N., Sun Z., Guo Q., Ma C., Shi Z. Experimental Investigation Concerning the Influence of Face Sheet Thickness on the Blast Resistance of Aluminum Foam Sandwich Structures Subjected to Localized Impulsive Loading. *Metals*. 2025. Vol. 15. P. 1122. <https://doi.org/10.3390/met15101122>
3. Tarlochan F. Sandwich Structures for Energy Absorption Applications: A Review. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 16. P. 4731. <https://doi.org/10.3390/ma14164731>
4. Jiang F. Blast response and multi-objective optimization of graded re-entrant circular auxetic cored sandwich panels. *Composite Structures*. 2023. Vol. 305. P. 116494. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116494>
5. Optimal design of composite sandwich panel with auxetic reentrant honeycomb using asymptotic equivalent model and PSO algorithm / P. Xiao et al. *Composite Structures*. 2024. Vol. 328. P. 117761. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117761>
6. Impulse saturation in metal plates under confined blasts / Y. Yuan et al. *International Journal of Impact Engineering*. 2022. P. 104308. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104308>
7. Chuanqing Chen, Yulong He, Rui Xu et al. Dynamic behaviors of sandwich panels with 3D-printed gradient auxetic cores subjected to blast load. *International Journal of Impact Engineering*. 2024. P. 104943. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104943>
8. Blast Resistance of Confined Multilayer Graded Corrugated-Core Sandwich Cylindrical Shells / P. Su et al. *Materials*. 2025. Vol. 19, no. 1. P. 101. <https://doi.org/10.3390/ma19010101>
9. Shats'kyi I. P. Limiting Equilibrium of a Plate with Partially Healed Crack. *Materials Science*. 2015. Vol. 51, no. 3. P. 322–330. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9845-5>
10. Perepichka V. V., Shats'kyi I. P. *Journal of Mathematical Sciences*. 2002. Vol. 109, no. 1. P. 1290–1294. <https://doi.org/10.1023/a:1013713215277>
11. Shats'kyi I. P., Makoviichuk M. V. Contact Interaction of the Crack Edges in the Case of Bending of a Plate with Elastic Support. *Materials Science*. 2003. 39. P. 371–376. <https://doi.org/10.1023/b:masc.0000010742.15838.44>
12. Andika S. P., Widagdo D., Pratomo A. N. Design and Multi-Objective Optimization of Auxetic Sandwich Panels for Blastworthy Structures Using Machine Learning Method. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 23. P. 10831. <https://doi.org/10.3390/app142310831>

13. Lam L., Chen W., Hao H., Li Z. Blast mitigation performance of sacrificial cladding with shear thickening fluid-filled origami metastructure core. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 344. P. 121415. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121415>

14. Kostopoulos V., Kalimeris G. D., Giannaros E. Blast protection of steel reinforced concrete structures using composite foam-core sacrificial cladding. *Composites Science and Technology*. 2022. P. 109330. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109330>

15. Study on blast resistance and energy dissipation mechanism of reinforced concrete-polyurea composite slabs under long duration blast loading of thermobaric explosives / J. Liu et al. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 345. P. 121440. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121440>

16. Rizwanullah M., Sharma H. K. Blast loading effects on UHPFRC structural elements: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022. Vol. 7, no. 6. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00937-2>

17. Hongxiang Yang, Kaicong Kuang, Yaqin Lu et al. Research on the dynamic response of open-web girders in new floor structures under near-blast load based on the CEL method. *Structures*. 2024. Vol. 65. P. 106692. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106692>

18. EN 1990:2023. *Eurocode – Basis of structural and geotechnical design*.

19. EN 1991-1-7. *Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-7: Accidental actions*.

20. DooJin Jeon, KiTae Kim, Han S. Modified Equation of Shock Wave Parameters. *Computation*. 2017. Vol. 5, no. 3. 5030041. <https://doi.org/10.3390/computation5030041>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 09.03.2026	Received 09.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 09.03.2026	Received in revised form 09.03.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

A. S. Velychkovych

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

A. V. Andrusiak*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

Y. V. Olevych

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-9945>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

*corresponding author, e-mail: andrii.andrusiak@nung.edu.ua

Rapid Assessment of the Blast Resistance of Laminated Plates for Protective Screens and Claddings

How to Cite:

Velychkovych A. S., Andrusiak A. V., Olevych Y. V. (2026). Rapid assessment of the blast resistance of laminated plates for protective screens and claddings. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 18-34. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-02)

Abstract. In construction and related engineering fields, there is a growing demand for protective screens and claddings capable of performing effectively under blast loading. This paper presents a rapid assessment method for evaluating the blast resistance of protective laminated plates intended for the design of such elements. The method targets the preliminary concept-selection stage, where alternative layouts must be compared quickly under constraints on areal mass and overall dimensions, and an initial design decision must be substantiated. The computational model is formulated within the linear Kirchhoff-Love plate theory, while the blast action is represented by an equivalent short-duration impulsive load whose generalized descriptor is an integral impulse measure. Preliminary structural performance is assessed using two indicators. The maximum deflection characterizes global compliance and is directly linked to functional requirements, in particular the allowable clearance to the protected object. The minimum safety factor with respect to allowable stresses identifies the critical layer and defines the direction for layout refinement. The method is presented as a step-by-step computational algorithm that enables variation of layer thicknesses, materials, and stacking sequence, producing results in an engineering-interpretable form. Key validation results are reported as a set of comparative and parametric calculations for three protective plate configurations, including a lightweight composite sandwich as an example of an alternative low-areal-mass solution class. For two widely used configurations—metal–polymer and ceramic–elastomer—relationships between “areal mass–deflection” and “areal mass–strength reserve” are obtained. It is shown that the thickness of the intermediate damping layer primarily governs deformability with a moderate mass increase, whereas increasing the face-sheet thickness rapidly enhances the strength reserve. The results confirm the suitability of rapid assessment as a tool for initial design decision-making and for preparing a justified baseline model for subsequent refinement in a finite-element framework.

Keywords: blast resistance, laminated plates, protective claddings, impulsive loading, Kirchhoff-Love theory, deflection, stresses, safety factor, areal mass.

УДК 711.4:004.94:519.87

С. І. Пустюльга

д.т.н., професор, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7623-7803>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В. П. Самчук*

к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Ю. С. Бондарчук

к.мист., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1890-9795>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

М. В. Заразка

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7652-5563>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: volodsam@ukr.net

Дискретно-воксельна оптимізація параметричних моделей міської інфраструктури

Цитувати як:

Пустюльга, С. І., Самчук, В. П., Бондарчук, Ю. С., Заразка, М. В. (2026). Дискретно-воксельна оптимізація параметричних моделей міської інфраструктури. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 35-52, [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-03)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розроблено та апробовано метод дискретно-воксельного моделювання для кількісної оцінки змін параметрів мікрорайону при інтеграції у його інфраструктуру нового житлового об'єкта. Міський простір формалізовано у вигляді регулярної тривимірної решітки з дискретним описом функціонального стану кожного елемента.

На прикладі інтеграції у сформовану забудову 108-квартирного житлового будинку виконано симуляцію зміни таких показників: об'ємна та площинна щільність забудови, інсоляційний режим і баланс сонячного надходження, транспортна доступність, забезпеченість озелененням. Модель реалізовано в середовищі MagicaVoxel: базовий крок решітки прийнято 3 м, а стан вокселя кодує тип простору (збудова, транспорт, зелена зона тощо), що дозволяє алгоритмічно обчислювати площі, об'єми та просторові відстані. Для щільності використано глобальні та локальні оцінки, для інсоляції – розрахунок енергетичного балансу для розрахункового зимового дня, для доступності – мінімальний час до транспортних вузлів.

Встановлено, що при інтеграції 10-поверхової будівлі: об'ємна щільність

дискретної моделі існуючої забудови збільшується на 1,8%; інсоляційний потенціал зменшується на ~11%; середній час транспортної доступності зростає на 8–9%; показники озеленення знижуються на 2–3%, залишаючись у межах нормативів.

Проведено варіаційний аналіз поверховості (10–12–15 поверхів) та визначено граничні значення, при яких відбувається істотне погіршення інсоляційних та транспортних характеристик.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованою методу дискретно-воксельного моделювання для попередньої кількісної перевірки містобудівних рішень, швидкого порівняння альтернатив ущільнення та оцінки їх відповідності нормативним вимогам.

Ключові слова: дискретно-воксельне моделювання, параметрика, оптимізація параметрів інфраструктури, дискретизація міського простору.

Вступ

Сучасний розвиток міст супроводжується зростаючою складністю інфраструктурних систем, що включають транспортні вузли, громадські простори, житлові квартали, інженерні, соціальні, комунікаційні мережі та екологічні складові. Традиційні підходи до архітектурного та містобудівного проектування, засновані на евклідовій геометрії та статичних типологічних схемах, дедалі менше відповідають вимогам адаптивності, варіативності та алгоритмічної керованості форм.

Однією з ключових проблем сучасного містобудування є недостатня формалізація процесу формоутворення в умовах багатофакторності. Проектні рішення часто приймаються інтуїтивно або на основі обмежених параметричних моделей, що не враховують дискретну природу цифрового середовища.

У цьому контексті виникає потреба у дослідженні дискретних підходів до параметричного проектування, зокрема, у використанні воксельного моделювання як інструменту просторової алгоритмізації.

Геометрична структура міста складається з дискретних об'ємних елементів, які можуть бути представлені як скінченна множина просторових клітин. Це дозволяє перейти до альтернативної парадигми – дискретного опису містобудівного простору, в якому геометрія стає похідною від структури решітки. У такій моделі простір описується як множина $\Omega \subset Z^3$, а всі морфологічні характеристики зводяться до функцій підрахунку, та сумування просторових відстаней.

Проблема дослідження полягає у відсутності математично коректної та експериментально перевіреної методики застосування дискретно-воксельного середовища для вирішення прикладних містобудівних задач, пов'язаних з оптимізацією щільності, інсоляції, транспортної доступності та озеленення.

Актуальність роботи визначається необхідністю створення швидких, масштабованих і алгоритмічно контрольованих моделей для попереднього аналізу можливих варіантів розвитку міських територій.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Аналіз відомих літературних джерел показав, що питання використання воксельних моделей у проектуванні та аналізі об'єктів міської інфраструктури є актуальним напрямом сучасних досліджень. Як правило, воксельне подання розглядається як зручна форма представлення 3D-середовища та засіб поєднання різних даних, а також як основа для окремих розрахунків і оцінок (інсоляційних, видимості, морфологічних і безпекових).

У роботі [1] узагальнено напрями використання вокселів в архітектурі та міському плануванні як способу поєднання різних типів даних. Водночас там не запропоновано практичного підходу, де воксельне подання виступає обчислювальною основою для одночасного розрахунку показників і вибору найкращих варіантів; причина – оглядовий характер роботи.

У дослідженнях [2, 3] розглянуто підходи до створення та поєднання 3D-міських даних у воксельному вигляді для подальших розрахунків і моделювання. Проте не показано, як на цій основі організувати пошук оптимальних параметрів міських об'єктів за кількома критеріями одночасно; причина – зосередження на підготовці даних та узгодженні подань.

У статті [4] запропоновано систему 3D-показників для опису міської морфології. Однак не розглянуто, як ці показники включати в дискретну воксельну модель разом з іншими міськими критеріями (сонце, доступність, озеленення) у межах однієї задачі; причина – орієнтація на опис і порівняння, а не на оптимізацію.

У публікаціях [5, 6] вокселі застосовано для вирішення задач інсоляції та затінення: зокрема, для відбору допустимих об'ємів за умовами затінення та для ефективного обчислення сонячного випромінювання на 3D-моделях міста. Водночас не враховано повний набір містобудівних показників та їх узгодження у єдиному алгоритмі відбору найкращого рішення; причина – вузька спеціалізація на інсоляційних обмеженнях.

У роботах [7, 8] воксельні підходи застосовано для оцінки видимості та для задач безпеки руху пішоходів у поєднанні з даними будівельних моделей. Проте ці дослідження не формують універсальної процедури багатокритеріального вибору параметрів міських об'єктів у воксельному середовищі; причина – тематична спрямованість на окремі прикладні задачі.

У роботах [9, 10] застосовано дискретно-геометричний підхід для розв'язання задач оптимізації, зокрема показано, що варіювання

геометричних параметрів дискретної моделі дає змогу цілеспрямовано покращувати якісні та безпекові показники функціонування транспортних систем. Такий результат підтверджує придатність дискретної формалізації для постановки цілей і обмежень та створює підґрунтя для поширення подібного підходу на проектування й аналіз об'єктів міської інфраструктури у воксельному 3D-поданні. При цьому, оптимізація має враховувати взаємопов'язані просторові, інсоляційні, транспортні та безпекові характеристики.

Огляд літературних джерел за темою дослідження свідчить, що на сьогодні немає ефективної комплексної методики, яка б дозволяла в єдиному дискретно-воксельному поданні описувати міське середовище, виконувати узгоджену оцінку ключових показників для параметричних варіантів міських об'єктів (просторових, інсоляційних, транспортних та екологічних), а також визначати найкращі параметри таких об'єктів з урахуванням обмежень і компромісів між показниками. Таким чином, постає актуальне науково-практичне завдання розробки науково обґрунтованого підходу до дискретно-воксельної оптимізації параметричних моделей міської інфраструктури, який забезпечував би порівняльний аналіз можливих варіантів розвитку, зіставлення альтернатив і обґрунтований вибір рішень для підвищення ефективності планувальних та інфраструктурних перетворень у міському середовищі.

Мета і завдання дослідження. Обґрунтувати можливість застосування дискретно-воксельного параметричного підходу до проектування об'єктів інфраструктури мікрорайонів міст та продемонструвати його практичну реалізацію в середовищі MagicaVoxel. Виконати математичну верифікацію розробленої дискретно-воксельної моделі оптимізації оновленої міської інфраструктури.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Формалізувати містобудівний простір як дискретну множину вокселів із визначенням функції їх стану.
2. Провести числову симуляцію для розрахунків об'ємної щільності дискретно-воксельної моделі мікрорайону.
3. Визначити баланс сонячного надходження та виконати інсоляційну оптимізацію інтегрованої воксельної моделі будівлі.
4. Провести верифікацію параметрів транспортної доступності мікрорайону в дискретно-воксельному середовищі.
5. Виконати просторово-кількісну оцінку ефективності озеленення мікрорайону в умовах ущільнення забудови.
6. Порівняти результати моделювання з нормативними вимогами.

Матеріали та методи

Воксельне середовище, зокрема програма MagicaVoxel, дозволяє розглядати міську інфраструктуру як дискретну систему, що складається з

модульних просторових одиниць. Такий підхід відкриває нові можливості для дослідження параметризму в умовах жорсткої просторової дискретизації. Результати попередніх досліджень авторів [9, 10] стали основою для формулювання наступних гіпотез роботи:

1. Дискретна воксельна модель може виступати повноцінним середовищем параметричного проектування інфраструктурних об'єктів.

2. Параметризм у воксельному середовищі реалізується через ітеративність, серійність та функціональну залежність просторових елементів.

3. Дискретність не обмежує архітектурну виразність, а сприяє формалізації містобудівних процесів.

4. MagicaVoxel може використовуватися як середовище для ефективного моделювання напрямів розвитку міської інфраструктури.

Дослідження базується на: теорії дискретних просторів, принципах параметричного моделювання, морфологічному аналізі та системному підході. Основою методу дослідження є експериментальне воксельне моделювання, порівняльний морфологічний аналіз варіацій, ітеративне тестування параметричних залежностей.

Інфраструктура мікрорайону описується через систему параметрів, які наведено у таблиці 1. У воксельному середовищі кожен із цих параметрів може бути формалізований через кількість та конфігурацію заповнених клітин.

Таблиця 1. Система параметрів для дискретно-воксельного аналізу інфраструктури

N	Групи параметрів	Аналізовані характеристики
1	Просторові параметри	– модуль забудови; – площа мікрорайону; – поверховість забудови; – щільність забудови.
2	Інсоляційні параметри	– потік сонячної енергії; – коефіцієнт освітленої площі; – енергетичний баланс.
3	Транспортні параметри	– кількість транспортно-активних вокселів; – ширина вулиць та транспортні вузли; – демографічне навантаження; – просторовий розподіл транспортної доступності; – інтегральний показник транспортної ефективності.
4	Екологічні параметри (озеленення)	– площа потенційного озеленення; – індекс озеленення.

Алгоритмізація містобудівного простору означає перехід від інтуїтивного формування до процедурної генерації, де:

- геометрія визначається набором параметрів;
- просторові зв'язки формалізуються;
- рішення можуть бути відтворені або масштабовані;
- варіативність закладена у саму структуру моделі.

У дискретно-воксельному середовищі така алгоритмізація набуває особливої чіткості, оскільки простір представлений як множина координатних клітин:

$$S = \{v_{x,y,z} \rightarrow x \in X, y \in Y, z \in Z\}, \quad (1)$$

де $v_{x,y,z}$ – кожен воксель має бінарний або багатозначний стан (заповнений, порожній, тип функції).

Таким чином, містобудівний простір може бути описаний як функція:

$$F: P \rightarrow S, \quad (2)$$

де P – множина параметрів, що визначають конфігурацію забудови, інфраструктури та ландшафту.

У межах даного дослідження міський простір інтерпретується як ортогональна тривимірна решітка:

$$G = (X, Y, Z),$$

де X, Y, Z – осі просторової системи координат.

Кожен осередок решітки є мінімальною морфологічною одиницею.

Таким чином, забудова мікрорайону набуває вигляду дискретної матриці:

$$M(x, y, z) = \begin{cases} 1 - \text{якщо клітина занята;} \\ 0 - \text{якщо клітина порожня.} \end{cases}$$

Розширена модель може включати багатозначний стан:

- 0 – відкрита територія;
- 1 – житлова забудова;
- 2 – транспорт;
- 3 – зелена зона;
- ...
- n – соціальна інфраструктура і т. д.

Це дозволяє розглядати будь-який мікрорайон міста як багатшарову інформаційну структуру.

Результати та обговорення

У межах розробленої теоретико-методологічної концепції дискретно-воксельного параметричного моделювання, виконано апробацію запропонованого підходу для конкретного об'єкту, а саме, інтеграції нової будівлі, із заданими техніко-економічними показниками, у мікрорайон «26 школа, м. Луцьк».

Вихідні умови:

- існує 3D-модель мікрорайону (рис. 1, а) та сформований у MagicaVoxel її воксельний аналог (рис. 1, б);
- визначена ділянка забудови (червоний прямокутник);
- необхідно інтегрувати в ділянку 108 квартирний житловий будинок;
- перший поверх – універсальний торговельний простір;
- параметри висоти визначити з урахуванням інсоляції та нормативів;
- зберегти баланс щільності, транспортної доступності та озеленення.

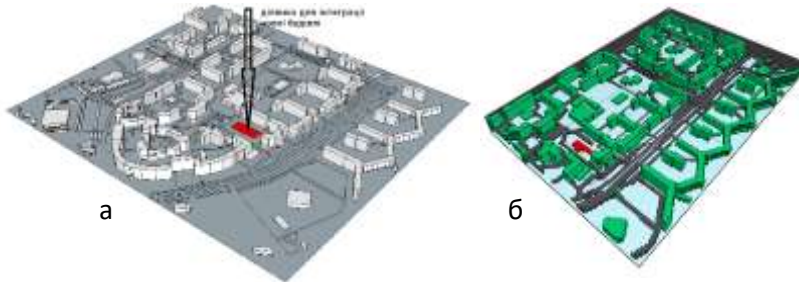


Рис. 1. Вихідна та адаптована дискретно-воксельна модель мікрорайону:
а – існуюча модель мікрорайону; б – адаптована дискретно-воксельна модель із виділеною ділянкою для розміщення нової будівлі

1. Числова симуляція об'ємної щільності дискретно-воксельної моделі мікрорайону

Базовою одиницею проектування є модуль – m , який визначає розмір дискретної сітки:

$$m = v \times k,$$

де v – розмір одного вокселя (3 м); k – кількість вокселів у модулі.

Щільність забудови мікрорайону визначається як відношення заповнених клітин до загального об'єму чи площі:

$$D_{3d} = \frac{\sum V_{zan}(x, y, z)}{V_{zag}}, \quad D_{2d} = \frac{\sum A_{zan}(x, y)}{A_{zag}},$$

де A – площа мікрорайону у вокселях; V – кількість дискретних вокселів.

Зміна показників D_{3d} і D_{2d} є параметричним механізмом трансформації морфології моделі.

Проведена числова симуляція та верифікація об'ємної щільності дискретно-воксельної моделі мікрорайону «26 школа, м. Луцьк». Існуючу модель мікрорайону представлено як тривимірну регулярну воксельну

решітку:

$$V = \{v_{i,j,k}\}, i \in [1, N_x], j \in [1, N_y], k \in [1, N_z],$$

де $N_x = 222, N_y = 157, N_z = 12$.

Загальна кількість вокселів: $N_{\text{заг}} = N_x \times N_y \times N_z = 418\,248$. Кожен воксель має бінарний стан: 0 – не зайнятий, 1 – зайнятий.

За проведеною цифровою реконструкцією морфології, обчислено показники просторової та площинної щільності забудови у дискретно-воксельній моделі:

Таблиця 2. Зведені показники щільності забудови

Показник	Значення	Показник	Значення
Загальна кількість вокселів	418 248	Площа території	666 x 471 = 313 686 м ²
Заповнені вокселі	70 058	Площа забудови	57 718 м ²
Порожні вокселі	348 190	Щільність забудови	0,184
Об'ємна щільність	0,167		


Обчислимо локальну щільність забудови мікрорайону (локальне вікно 40×40×12). Функція локальної щільності:

$$D(x, y) = \frac{\sum S(v_{i,j,k})}{W}, \quad (3)$$

де $W = 40 \times 40 \times 12 = 19\,200$.

Результати розрахунків та карта щільності забудови мікрорайону наведені у таблиці 3.

Таблиця 3. Формування карти щільності забудови мікрорайону «26 школа, м. Луцьк»


Зона	Щільність	
Оранжева	0,31	
Жовта	0,18	
Зелена	0,05	
Середня по району	0,167	

Виконаємо інтеграцію моделі 108-квартирного будинку в існуючу забудову. Параметри нового об'єкта: габарити: 20 × 4 вокселів; висота: 10

(вокселів); об'єм: $N_{нов} = 20,1 \times 4,4 \times 10 \approx 880$. Оновлена модель, вносить корективи у формування показників щільності. Об'ємна щільність зростає на 1,8%, а параметри щільності та оновлена карта наведені у таблиці 4.

Таблиця 4. Показники зміни загальної щільності вокселів забудови мікрорайону після інтеграції будівлі

Показник	До	Після
Заповнені вокселі	70 058	70 938
Загальні	418 248	418 248
Об'ємна щільність	0,167	0,17
Приріст	–	+1,8 %



Приріст градієнта щільності не критичний. При цьому можна зробити наступні висновки. Мікрорайон має помірну об'ємну щільність (16-18%). Локальні піки не перевищують 0,31. Інтеграція 108-квартирного будинку підвищує середню щільність лише на 0,03%. Морфологічний баланс моделі після інтеграції – зберігається.

2. Баланс сонячного надходження та інсоляційна оптимізація інтегрованої будівлі

Інсоляція у містобудівному середовищі має подвійну природу: санітарно-гігієнічні характеристики (тривалість прямого сонячного освітлення) та енергетичний баланс (сумарне сонячне теплове надходження).

У запропонованій в роботі дискретно-воксельній моделі інфраструктурного простору, виникає можливість перейти від якісної оцінки освітленості елементів забудови до кількісного розрахунку енергетичного балансу через інтегрування сонячного потоку по площі фасадів та території.

Геометрія воксельного середовища:

$$V = \{v_{i,j,k}\}, i \in [1,222], j \in [1,157], k \in [1,12].$$

Крок решітки: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3 \text{ м}$. Площа території:

$$A = 666 \times 471 = 313\,686 \text{ м}^2.$$

Для зимового розрахункового дня (22 грудня): Висота сонця:

$\alpha = 20^0$. Сонячна радіація: $G_p = 450 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Дифузна складова:
 $G_o = 120 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Сумарна: $G_{\text{сум}} = 570 \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Потік сонячної енергії на горизонтальну поверхню:

$$Q_s = G_p \times \sin 20^0 + G_o = 153,9 + 120 = 273,9.$$

Тривалість активного сонячного періоду: $t = 6 \text{ год}$. Енергія, отримана за день:

$$E = Q_s \times t = 273,9 \times 6 = 1,64 \text{ кВт} / \text{м}^2.$$

Енергетичний баланс до інтеграції 10-поверхової будівлі. Середня інсоляція: $I_c = 4,73 \text{ год}$. Коефіцієнт освітленої площі: $k_{\text{осв}} = 4,73 / 6 = 0,788$. Енергетичний потік:

$$E_n = 1,64 \times 0,788 = 1,29 \text{ кВт} / \text{м}^2.$$

Сумарна енергія по мікрорайону:

$$E_{\text{сум}} = 1,29 \times 313686 = 404655 \text{ кВт} / \text{год}.$$

Енергетичний баланс після інтеграції будівлі (таблиця 5). Для 10-поверхової будівлі: середня інсоляція: $I_c = 4,2 \text{ год}$, коефіцієнт освітленої площі: $k_{\text{осв}} = 4,2 / 6 = 0,7$.

Енергетичний потік: $E_n = 1,64 \times 0,7 = 1,148 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$. Сумарна енергія:

$$E_{\text{сум}} = 1,148 \times 313686 = 360111 \text{ кВт} / \text{год}.$$

Енергетичні втрати: $\Delta E = 404655 - 360111 = 44544$.

Відносне зменшення (при 10 поверхах):

$$\frac{44544}{404655} \times 100\% = 11\%.$$

Таблиця 5. Варіаційний аналіз енергоефективності при різних варіантах поверховості інтегрованої будівлі

Поверхи	Середня інсоляція	Енергія (кВт·год/м ²)	Загальна енергія
10	4,2	1,148	360 111
12	4,12	1,113	349 132
15	3,96	1,08	338 780

При 15 поверхах – втрата становить: 16%.

Енергетичний баланс фасадів нового будинку. Площа фасадів: $A_{\text{ф}} = 2(L + W) \times H = 2(60 + 12) \times 30 = 4320 \text{ м}^2$. Сонячне надходження

(південний фасад): $Q_{\phi} \approx 350 \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Денна енергія фасаду: $Q_{\phi} \approx 350 \times 6 = 2,1 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$. Загальне надходження: $4320 \times 2,1 = 9072 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$.

Інтегральний енергетичний показник із врахуванням коефіцієнту балансу:

$$B = \frac{E_{\text{район}} + E_{\text{нов}}}{E_{\text{до}}} = \frac{360\,111 + 9\,072}{404\,655} = 0,91.$$

Тобто, система зберігає 91% енергетичного потенціалу. Інтеграція 10-поверхового об'єкта зменшує середній інсоляційний потенціал на 11%. Енергетичні втрати становлять ~ 44 МВт·год за розрахунковий зимовий день. Новий будинок генерує додатковий фасадний сонячний потенціал ~ 9 МВт·год. Енергетично оптимальним для нового будинку є діапазон 9–10 поверхів. При 15 поверхах виникає енергетичний дисбаланс ($>15\%$).

3. Параметри транспортної доступності мікрорайону в дискретно-воксельному середовищі

Транспортна доступність визначається як функція мінімального часу переміщення від кожної точки житлової забудови до ключових транспортних вузлів. У воксельній моделі простору задача формалізується як:

$$T(x, y) = \min \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i}, \quad (4)$$

де d_i – довжина сегмента шляху, v_i – швидкість пересування по сегменту, n – кількість сегментів оптимального маршруту.

Дискретна геометрична модель території мікрорайону складає 222×157 вокселів. Крок решітки: 1 воксель = 3 м. Кількість транспортно-активних вокселів: $N_m = 1332$ вокселів – головна магістраль (просп. Соборності), де курсує громадський транспорт – $S_m = 11\,988 \text{ м}^2$. Загальна кількість зайятих вокселів, включаючи, додатково, проїзди, в'їзди та пішохідні доріжки на мікрорайоні: $N_s = 3960 + 1332 = 5292$ вокселів, із площею $S_s = 47\,630 \text{ м}^2$.

У моделі враховано наступні транспортні вузли: 1 головний шляхопровід, 3 магістральні в'їзди до нього, 7 зупинок громадського транспорту.

Показники транспортної доступності мікрорайону до i після інтеграції нової будівлі наведено у таблиця 6. Середній час доступу по мікрорайону до інтеграції: $T_i = 6,8$ хв. Інтегрування нової будівлі вносить певні корективи. Середня заселеність нового будинку: 3 особи/квартиру –

$w = 324$ особи.

Генерація власного транспорту: 0,45 авто/квартиру x 108 квартир \approx 49 авто. При цьому змінюється інтенсивність руху по магістральному проїзду в околі нового будинку, завдяки додатковому потоку: $Q_d = 49 \times 2 = 98$ поїздок/день. Пікове навантаження: 18 авто/год. При цьому середній час доступу збільшиться: $T_2 = 7,2$ хв. – завдяки локальному впливу інтеграції будівлі та збільшення часу доступу в околі будинку до головної магістралі (до інтеграції: $T = 5,6$ хв., після інтеграції: $T = 6,2$ хв., що становить зростання часу доступу на +10%). Середній час доступу по мікрорайону зростає до: $T_2 = 7,2$ хв., що становить +0,4 хв.

Таблиця 6. Просторовий розподіл транспортної доступності до і після інтеграції нової будівлі

До інтеграції			Після інтеграції		
Час доступу	Площа	Частка	Час доступу	Площа	Частка
< 5 хв	10 700 м ²	19%	< 5 хв	10 700 м ²	18%
5–8 хв	25 500 м ²	44%	5–8 хв	26 350 м ²	45%
8–12 хв	7 110 м ²	12%	8–12 хв	7 110 м ²	12%
> 12 хв	14 100 м ²	25%	> 12 хв	14 100 м ²	25%

На рисунку 2 наведено карту моделі доступності до транспортних вузлів мікрорайону. Принцип побудови просторової карти: зелений колір < 5 хв.; жовтий колір 5-8 хв.; фіолетовий колір 8-12 хв.; червоний колір > 12 хв.



Рис. 2. Карта-модель транспортної доступності мікрорайону до базових транспортних вузлів

Введемо інтегральний показник транспортної ефективності:

$$A = \frac{1}{T}.$$

До інтеграції будівлі: $A = 0,147$. Після – $A = 0,139$. Зниження: – 5,5%.

Просторово-морфологічний аналіз дискретно-воксельної моделі показав, що новий 108-квартирний будинок збільшує середній час доступу у мікрорайоні на 8-9%. Жовта зона, в яку попадає новобудова (> 5 -8 хв.), збільшує час доступності на +10%. Внутрішньоквартальний проїзд в околі інтегрованого будинку працює у режимі граничної пропускної здатності. Критичне транспортне перевантаження може настати уже при інтеграції будинку >140 квартир.

Мікрорайон зберігає нормативну транспортну доступність, однак входить у фазу зниження ефективності. Оптимізація можлива через: розширення проїзду біля інтегрованої будівлі ще на 1 смугу або введення одностороннього руху.

4. Просторово-кількісна оцінка ефективності озеленення мікрорайону в умовах ущільнення забудови

Ущільнення житлової забудови є актуальним інструментом модернізації міського середовища, проте воно супроводжується ризиками зниження якості простору за рахунок зменшення параметрів озеленення та транспортної доступності.

Відсутність комплексної кількісної моделі часто призводить до локального перевантаження території. Для даного випадку, загальна площа моделі мікрорайону складає: $A_3 = 313\,686 \text{ м}^2$. Загальна площа його потенційного озеленення (до інтеграції): $A_{оз} = 208\,338 \text{ м}^2$.

Ефективним вважається озеленення, яке: розташоване в радіусі 300 м від житлових будинків; не перекрите забудовою; не знаходиться у санітарно-захисній зоні дороги.

Формалізуємо дане положення:

$$A_{\text{ефект}} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot f(d_i), \quad f(d) = \{1(d \leq 300), 0(d > 300)\}. \quad (5)$$

До інтеграції будівлі середня чисельність жителів мікрорайону: $P = 26\,400$ осіб. Площа для потенційного озеленення – $208\,338 \text{ м}^2$, площа мікрорайону – $313\,686 \text{ м}^2$, площа забудови – $57\,718 \text{ м}^2$, площа доріг, проїздів та тротуарів – $47\,630 \text{ м}^2$ (рис. 3).

Озеленення на одну особу складає: $G = \frac{208\,338}{26\,400} = 7,89 \text{ м}^2$. Норматив

– $\geq 6 \text{ м}^2/\text{особу}$ – виконується. Індекс озеленення – $I = \frac{7,89}{6} = 1,31$. Система

перевищує норматив на 30%.

Інтеграція 108-квартирного будинку (10 поверхів) збільшує чисельність жителів на 324 особи. Середня кількість жителів виросте до 26 724 осіб.

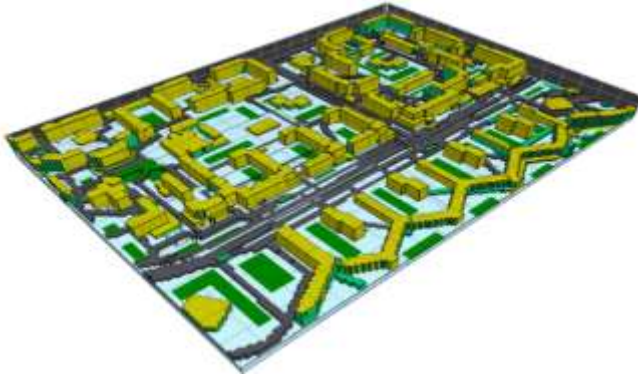


Рис. 3. Воксельна карта-модель озеленення (існуючого та потенційного) мікрорайону (зелені зони)

Площа потенційного озеленення, враховуючи під'їзди та виступаючий офіс, зменшиться на 1320 м^2 . Озеленення на одну особу зменшиться до: $G = \frac{207018}{26724} = 7,7 \text{ м}^2$. Норматив $6 \text{ м}^2/\text{особу}$ – виконується.

Індекс озеленення впаде до на 2,3%. $I = \frac{7,7}{6} = 1,28$. $\Delta = -2,3\%$

Проведений аналіз із використанням дискретно-воксельного моделювання показав, що інтеграція 10-поверхового будинку зменшує забезпеченість зеленими площами на 2,3%, однак норматив $6 \text{ м}^2/\text{особу}$ не порушується. Дефіцит озеленення має локальний характер і формується переважно в зоні, прилеглої до новобудови. Компенсація можлива за рахунок додаткового озеленення на суміжних територіях. З погляду показників озеленення раціонально є поверховість новобудови в межах 9-10 поверхів. Існуючий мікрорайон у базовому стані відповідає нормативним вимогам, тоді як після інтеграції 108-квартирного будинку доцільно передбачити просторові заходи компенсації зелених площ.

Висновки

1. У роботі розроблено та апробовано методику практичної

формалізації містобудівного простору як дискретної множини вокселів із описом функціонального стану кожного елемента. Введено систему морфологічних параметрів для обчислення щільності забудови, вертикального розподілу об'ємів, інсоляційного індексу, транспортної доступності та коефіцієнта озеленення.

2. Виконано числову симуляцію розрахунків об'ємної щільності дискретно-воксельної моделі мікрорайону до і після інтеграції нової будівлі в дискретний простір. Розглянуто ефективність різних варіантів забудови. Доведено, що при інтеграції в модель мікрорайону «26 школа, м. Луцьк» 10-поверхової будівлі, морфологічний баланс мікрорайону – зберігається.

3. Визначено баланс сонячного надходження та виконано інсоляційну оптимізацію інтегрованої воксельної моделі будівлі.

4. Виконано перевірку показників транспортної доступності мікрорайону в дискретно-воксельному середовищі. Встановлено, що після інтеграції нової будівлі нормативна доступність зберігається, однак фіксується зниження транспортної ефективності. Запропоновано напрями покращення доступності в локальній проблемній зоні.

5. Виконано просторово-кількісну оцінку забезпеченості озелененням мікрорайону в умовах ущільнення забудови. Аналіз на основі дискретно-воксельного моделювання показав, що інтеграція 10-поверхового будинку зменшує зелені площі на 2,3%, що зумовлює потребу в компенсаційному озелененні.

6. Виконано порівняльний аналіз результатів дискретно-воксельного параметричного моделювання процесу інтеграції будівлі в існуючий мікрорайон із нормативними вимогами. Визначено що практично всі нормативні показники у процесі інтеграції – зберігаються.

7. Запропонований підхід закладає основи розвитку нового напрями дискретно-воксельного моделювання для попередньої кількісної перевірки містобудівних рішень та оцінки їх відповідності нормативним вимогам. Модель демонструє високу алгоритмічну прозорість та дозволяє ефективно уніфікувати, масштабувати і спростити алгоритми обчислень. Перспективними є дослідження інтеграції методики з генетичними алгоритмами та GIS.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори засвідчують, що під час підготовки тексту штучний інтелект не використовувався.

References

1. Тус, J., Selami, T., Hensel, D. S., & Hensel, M. (2023). A Scoping Review of Voxel-Model Applications to Enable Multi-Domain Data Integration in Architectural Design and Urban Planning. *Architecture*, 3(2), 137-174. <https://doi.org/10.3390/architecture3020010>
2. Fujiwara, K., Tsurumi, R., Kiyono, T., Fan, Z., Liang, X., Lei, B., Yap, W., Ito, K., & Biljecki, F. (2026). VoxCity: A seamless framework for open geospatial data integration, grid-based semantic 3D city model generation, and urban environment simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 123, 102366. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2025.102366>
3. Gorte, B., Zlatanova, S., Pilouk, M., Diakite, A., & Barton, J. (2024). 3D Data Integration in the Voxel Domain. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4–2024, 133–140. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-2024-133-2024>
4. Labetski, A., Vitalis, S., Biljecki, F., Arroyo Otori, K., & Stoter, J. (2023). 3D building metrics for urban morphology. *International Journal of Geographical Information Science*, 37(1), 36–67. <https://doi.org/10.1080/13658816.2022.2103818>
5. Liang, J., & Gong, J. (2017). A Sparse Voxel Octree-Based Framework for Computing Solar Radiation Using 3D City Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(4), 106. <https://doi.org/10.3390/ijgi6040106>
6. Alkadri, M. F., Luca, F. D., Turrin, M., & Sariyildiz, S. (2020). A Computational Workflow for Generating A Voxel-Based Design Approach Based on Subtractive Shading Envelopes and Attribute Information of Point Cloud Data. *Remote Sensing*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/rs12162561>
7. Chmielewski, S. (2021). Towards Managing Visual Pollution: A 3D Isovist and Voxel Approach to Advertisement Billboard Visual Impact Assessment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(10), 656. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100656>
8. Aleksandrov, M., Zlatanova, S., Heslop, D. J., & Diakite, A. (2024). BIM-based connectivity graph and voxels classification for pedestrian-hazard interaction. *Journal of Spatial Science*, 69(3), 699–719. <https://doi.org/10.1080/14498596.2023.2281923>
9. Pustiulha, S., Samchuk, V., Samostian, V., Prydiuk, V., & Dembitskij, V. (2023). Influence of the City Transport Route Network Discrete Model Geometrical Parameters on a Quality of a Passenger Traffic System Operation. In O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos, & Y. Tsegelnyk (Eds.), *Smart Technologies in Urban Engineering* (Vol. 536, pp. 740–751). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_66
10. Pustiulha, S., Samchuk, V., Prydiuk, V., Pasichnyk, O., & Shymchuk, O. (2024). Improving safety criteria for transporting hazardous goods by road through optimizing the geometric parameters of their stowage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (129)), Article 3 (129). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.307235>

Література

1. Tyc, J., Selami, T., Hensel, D. S., & Hensel, M. (2023). A Scoping Review of Voxel-Model Applications to Enable Multi-Domain Data Integration in Architectural Design and Urban Planning. *Architecture*, 3(2), 137-174. <https://doi.org/10.3390/architecture3020010>
2. Fujiwara, K., Tsurumi, R., Kiyono, T., Fan, Z., Liang, X., Lei, B., Yap, W., Ito, K., & Biljecki, F. (2026). VoxCity: A seamless framework for open geospatial data integration, grid-based semantic 3D city model generation, and urban environment simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 123, 102366. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2025.102366>
3. Gorte, B., Zlatanova, S., Pilouk, M., Diakite, A., & Barton, J. (2024). 3D Data Integration in the Voxel Domain. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4–2024, 133–140. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-2024-133-2024>
4. Labetski, A., Vitalis, S., Biljecki, F., Arroyo Ogori, K., & Stoter, J. (2023). 3D building metrics for urban morphology. *International Journal of Geographical Information Science*, 37(1), 36–67. <https://doi.org/10.1080/13658816.2022.2103818>
5. Liang, J., & Gong, J. (2017). A Sparse Voxel Octree-Based Framework for Computing Solar Radiation Using 3D City Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(4), 106. <https://doi.org/10.3390/ijgi6040106>
6. Alkadri, M. F., Luca, F. D., Turrin, M., & Sariyildiz, S. (2020). A Computational Workflow for Generating A Voxel-Based Design Approach Based on Subtractive Shading Envelopes and Attribute Information of Point Cloud Data. *Remote Sensing*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/rs12162561>
7. Chmielewski, S. (2021). Towards Managing Visual Pollution: A 3D Isovist and Voxel Approach to Advertisement Billboard Visual Impact Assessment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(10), 656. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100656>
8. Aleksandrov, M., Zlatanova, S., Heslop, D. J., & Diakite, A. (2024). BIM-based connectivity graph and voxels classification for pedestrian-hazard interaction. *Journal of Spatial Science*, 69(3), 699–719. <https://doi.org/10.1080/14498596.2023.2281923>
9. Pustiulha, S., Samchuk, V., Samostian, V., Prydiuk, V., & Dembitskij, V. (2023). Influence of the City Transport Route Network Discrete Model Geometrical Parameters on a Quality of a Passenger Traffic System Operation. In O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos, & Y. Tsegelnyk (Eds.), *Smart Technologies in Urban Engineering* (Vol. 536, pp. 740–751). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_66
10. Pustiulha, S., Samchuk, V., Prydiuk, V., Pasichnyk, O., & Shymchuk, O. (2024). Improving safety criteria for transporting hazardous goods by road through optimizing the geometric parameters of their stowage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (129)), Article 3 (129). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.307235>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 04.04.2026	Received 04.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 17.05.2026	Received in revised form 17.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

S. I. Pustiulha

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7623-7803>
Department of Architecture and Design
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

V. P. Samchuk*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

Yu. S. Bondarchuk

Ph.D. in Arts, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1890-9795>
Department of Architecture and Design
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

M. V. Zarazka

PhD student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7652-5563>
Department of Architecture and Design
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: volodsam@ukr.net

Discrete-Voxel Optimization of Parametric Models of Urban Infrastructure

How to Cite:

Pustiulha S. I., Samchuk V. P., Bondarchuk Yu. S., Zarazka M. V. (2026). Discrete-Voxel Optimization of Parametric Models of Urban Infrastructure. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 35-52, [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-03)

Abstract. This paper develops and validates a discrete-voxel modelling method for the quantitative assessment of microdistrict changes when a new residential building is introduced into existing urban infrastructure. Urban space is represented as a regular 3D grid with a discrete functional state for each cell. Using the integration of a 108-apartment building into an established neighbourhood, we simulate changes in volumetric and planar building density, insolation regime and solar-gain balance, transport accessibility, and green-space provision. The model is implemented in MagicaVoxel: the base grid step is 3 m, and voxel states encode land-use types (built-up, transport, green areas, etc.), enabling algorithmic computation of areas, volumes, and distances. Density is evaluated by global and local measures; insolation by an energy-balance calculation for a representative winter day; accessibility by minimum travel time to transport hubs. For a 10-storey option, volumetric density increases by 1.8%, insolation potential decreases by ~11%, average accessibility time rises by 8–9%, and green-space indicators drop by 2–3% while remaining within regulatory limits. A height variation study (10–12–15 storeys) identifies threshold values where insolation and transport performance deteriorate markedly, providing a basis for selecting acceptable design ranges. Due to the grid-based structure, computations are scalable and well suited to early-stage decision support and rapid comparison of alternatives. Overall, the approach offers a transparent multi-criteria workflow that can be extended to automated search of parameter sets under normative constraints.

Keywords: discrete-voxel modelling, parametrics, infrastructure parameter optimization, discretization of urban space.

УДК 624.191

А. С. Лапченко*

к.т.н., старший науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4037-5395>

Кафедра мостів, тунелів та гідротехнічних споруд

Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 02000

*автор-кореспондент, email: las83@ukr.net

Порівняння послідовної та паралельної схем електродетонаторних мереж при проходженні тунелів

Цитувати як:

Лапченко, А. С. (2026). Порівняння послідовної та паралельної схем електродетонаторних мереж при проходженні тунелів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 53-65, [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-04)

© 2026, Автор. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. Підривні роботи в тунелях є складним інженерним процесом, що потребує точного контролю систем ініціювання вибуху. Електродетонатори широко застосовуються у підземному будівництві, де схема їх підключення (послідовна, паралельна) суттєво впливає на: безпеку, ефективність і надійність. У цій роботі представлено порівняльний аналіз послідовних і паралельних електричних схем підключення електродетонаторів у тунельних умовах. Проведено огляд актуальних досліджень і наукової літератури стосовно порівняння послідовної та паралельної схем електричних мереж детонаторів, що використовуються в тунельних вибухових роботах. На основі проведеного огляду поставлена мета та задачі дослідження щодо розрахунку, побудови та аналізу залежностей фізичних величин послідовної і паралельної схем електродетонаторних мереж від їх параметрів при проходженні тунелів. Сила струму в магістральному провіднику не здатна забезпечити гарантійний струм, величина якого повинна становити не менше 2,5 А, не залежно від величини розглянутої змінної напруги та за послідовно підключеної електричної мережі детонаторів. За паралельної схеми підключення мідна та алюмінієва жили повністю забезпечують гарантійний струм в магістральному провіднику в усьому діапазоні досліджуваних його параметрів не залежно від величини змінної напруги при проходженні тунелів, окрім використання мідної магістральної жили довжиною 2000 м та площею поперечного перерізу 0,75 мм² за напруги 220 В. Оцінювана сталь за поперечного перерізу в 1,1 мм² не здатна забезпечити гарантований струм при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 380 В, а також при довжині магістрального провідника 500 м і більше та напрузі 220 В. При розробці великих тунелів одразу на всю площу поперечного перерізу, призначеного для залізничних тунелів з мінімум двома коліями або автомобільних доріг завширишки 10 м і більше, використання послідовної схеми

підключення детонаторів неможливо, доцільно використання паралельної схеми. Результати можуть бути корисними для інженерів при виборі систем ініціювання.

Ключові слова: алюміній, детонатор, мідь, опір дротів, оцинкована сталь, послідовна та паралельна електродетонаторна мережа, сила струму, тунель.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

Будівництво тунелів часто базується на буропідричних роботах для ефективного руйнування гірських масивів. Дуже часто застосування буропідричних робіт не потребує влаштування тунельної оправи або частини її елементів [1], в тому числі і з сучасних видів цементобетону [2], що в цілому сприяє економічній ефективності. Успіх підричних робіт залежить від правильного ініціювання вибухових речовин, яке здійснюється за допомогою детонаторів, включно з електродетонаторами [3-7]. В електродетонаторах ініціює вибухову речовину електрична енергія, яка подається через електричну підричну мережу: послідовну, паралельну або послідовно-паралельну [4-6, 8, 9]. Серед них послідовні та паралельні мережі виступають базовими для розуміння принципів проєктування підричних систем, особливо в умовах тунельних робіт з обмеженим простором і потребою в критично важливій точності.

Схема з'єднання електродетонаторів відіграє ключову роль у функціонуванні підричної системи [3-6, 8, 9], тому надзвичайно важливо розуміти всі переваги і недоліки застосування кожної з схем. Порівняльний аналіз застосування паралельної чи послідовної схем з'єднання електродетонаторних мереж в тунелебудуванні наведено в табл. 1.

Аналізуючи табл. 1 можна бачити, що послідовні та паралельні електричні кола електродетонаторних мереж мають свої переваги та недоліки. Послідовні схеми простіші та потребують менше енергії, але мають ризик повної відмови. Паралельні – більш надійні, але складніші в контролі та вимагають більших ресурсів.

Крім індивідуальних переваг і недоліків послідовної та паралельної схем електричної мережі детонаторів існує загальне обмеження – для всіх схем з метою забезпечення безвідмовного висадження необхідно, щоб розрахована сила струму була не менше гарантійного струму, величина якого повинна становити не менше 2,5 А при підриванні змінним струмом [4, 9]. В тунелебудуванні джерелом живлення дуже часто виступає змінний струм від освітлювальної чи силової електромережі напругою 220 В чи 380 В [4, 5, 9]. При електропідриванні для передачі струму від джерела до електродетонаторів застосовують різні види дротів з

потрібними характеристиками: матеріалом жили дроту [4, 5, 9], певною площею поперечного перерізу [4, 5], видом ізоляції жили дроту [5] та призначенням дроту [4, 5].

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз застосування послідовної та паралельної схем електричних підливних мереж в тунелебудуванні.

Параметр	Обговорення	Послідовна схема	Паралельна схема	Джерело посилання
1	2	3	4	5
Струм	<p>У послідовному колі всі детонатори з'єднані один за одним, утворюючи єдиний шлях струму.</p> <p>У паралельному колі детонатори підключені до спільних шин живлення, утворюючи кілька гілок.</p> <p>В послідовній схемі потрібен менший струм порівняно з паралельними схемами.</p>	Однаковий	Розподілений	7, 8, 10, 11
Опір	Послідовне коло – загальний опір дорівнює сумі опорів. Паралельне коло – загальний опір зменшується. Це означає, що паралельні кола потребують більшого струму.	Високий	Низький	11
Потужність	В паралельній схемі потрібне потужніше джерело живлення.	Низька	Висока	11
Надійність	Послідовні схеми більш чутливі до механічних пошкоджень, що особливо актуально в умовах тунелю.	Нижча	Вища	7, 10, 11
Діагностика	Послідовні кола прості у проектуванні та перевірці. Можна перевірити всю систему послідовної мережі з безпечної відстані.	Легка (проста)	Складна	10, 11

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
	Важко перевірити кожен гілку паралельної схеми після монтажу.			
Ризик відмови	Пошкодження одного елемента в послідовній схемі призводить до відмови всієї системи. Відмова одного детонатора в паралельній схемі не впливає на інші. Через нерівномірний розподіл струму в паралельній мережі виникає ризик неповного підриву.	Повний	Частковий	7, 10, 11
Особливості застосування	У паралельних схемах можливий нерівномірний розподіл струму через різницю опорів, що може призвести до відмови ініціювання. Паралельні схеми іноді застосовуються через простоту монтажу, тоді як послідовні – для більш контрольованого підриву. Паралельну схему зручно використовувати у складних умовах, за рахунок гнучкості монтажу.	Контрольовані вибухи	Складні мережі	11
Безпека	Послідовні кола зменшують ризик часткового підриву. Паралельні кола можуть залишати нездетоновані заряди.	Безпечніші	Менш безпечніші	7, 8, 9

Крім індивідуальних переваг і недоліків послідовної та паралельної схем електричної мережі детонаторів існує загальне обмеження – для всіх схем з метою забезпечення безвідмовного висадження необхідно, щоб розрахована сила струму була не менше гарантійного струму, величина якого повинна становити не менше 2,5 А при підриванні змінним струмом

[4, 9]. В тунелебудуванні джерелом живлення дуже часто виступає змінний струм від освітлювальної чи силової електромережі напругою 220 В чи 380 В [4, 5, 9]. При електропідживанні для передачі струму від джерела до електродетонаторів застосовують різні види дротів з потрібними характеристиками: матеріалом жили дроту [4, 5, 9], певною площею поперечного перерізу [4, 5], видом ізоляції жили дроту [5] та призначенням дроту [4, 5].

Компонування магістральних, з'єднувальних та інших дротів з різним матеріалом жили та її площею поперечного перерізу за різної кількості детонаторів з одночасним застосуванням певної схеми може давати безліч різних варіантів. Для конкретного потрібного варіанту розраховуються опір дротів і електродетонаторів, а також визначають силу струму в магістральних дротах та детонаторах. Потім перевіряється забезпечення у відповідності до гарантійного струму. Перевірка кожного разу певного варіанту електричної мережі детонаторів з їх коригуванням може вимагати певного часу в розрахунках і може бути доволі громіздкою справою. Побудова типових залежностей розрахункового опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах та детонаторах від параметрів дротів і їх довжини при потрібній кількості детонаторів значно спростила б процес підбору параметрів дроту. Також навпаки, за відомими параметрами дротів електродетонаторної мережі можна швидко знайти опір електричної мережі та силу струму. На сьогоднішній момент відсутні побудовані типові залежності фізичних величин послідовної та паралельної електродетонаторної мережі від її параметрів при проходженні тунелів.

Мета і завдання дослідження. Отримання, порівняння розрахункового опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах при послідовному і паралельному з'єднанні від параметрів дротів і їх довжини при проходженні тунелів.

Для досягнення сформульованої мети потрібно розв'язати такі завдання: огляд актуальних досліджень і наукової літератури; розрахунок та побудова залежностей фізичних величин послідовної і паралельної схем електродетонаторних мереж від їх параметрів при проходженні тунелів; аналіз побудованих залежностей та встановлення можливості застосування певних видів дротів при проходженні тунелів потрібної довжини залежно від послідовної чи паралельної схем підключення.

Матеріали та методи

Для розрахунку електричної мережі було прийнято 140 детонаторів, як усереднене значення потрібної кількості при проходженні залізничних та автомобільно-дорожніх тунелів суцільним вибоєм за одну заходку за

ширини майбутнього тунелю 10 м і більше. Для розрахунку використовували дроти з наступних матеріалів жили: мідь, алюміній, оцинкована сталь. Площі поперечних перерізів жил магістральних провідників становили: оцинкована сталь – 1,1 мм², мідь – 0,75-10 мм², алюміній – 2,5-10 мм². Вибір типорозміру магістрального провідника був обумовлений номенклатурою випуску вітчизняними та закордонними виробниками. Розрахунок опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах за послідовної та паралельної схем підключення проведено на основі відомих фізичних формул згідно з [12].

Результати та обговорення

На рис. 1 та рис. 2 відповідно наведено залежність загального опору електропровідної мережі за послідовної та паралельної схем підключення в залежності від матеріалу, довжини та площі поперечного перерізу жили магістрального провідника при застосуванні одного виду мідних з'єднувальних дротів з площею поперечного перерізу жили 0,5 мм² та одного виду детонаторного мідного проводу з площею поперечного перерізу жили 0,2 мм². Застосування такого виду з'єднувальних і детонаторних дротів обумовлено найбільшою їх розповсюдженістю у вітчизняних і закордонних виробників з одночасно мінімально допустимою витратою матеріалу жили дроту.

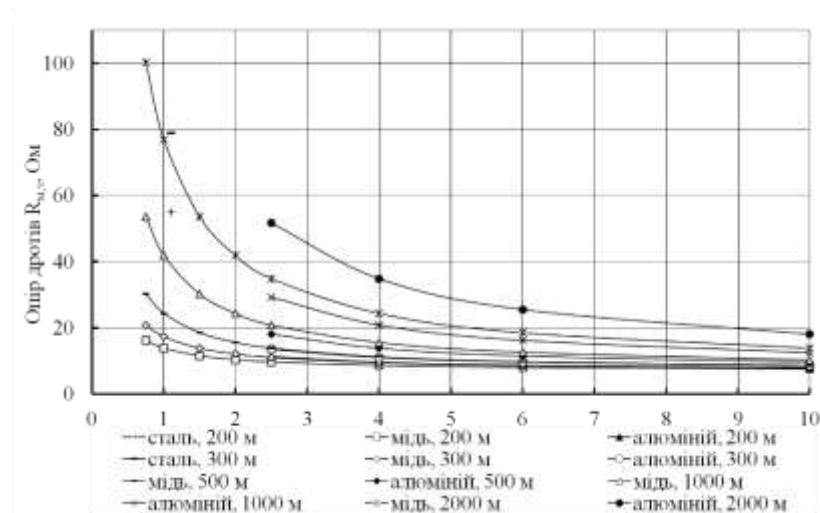


Рис. 1 – Залежність загального опору електропровідної мережі за послідовної схеми підключення в залежності від параметрів магістрального провідника.

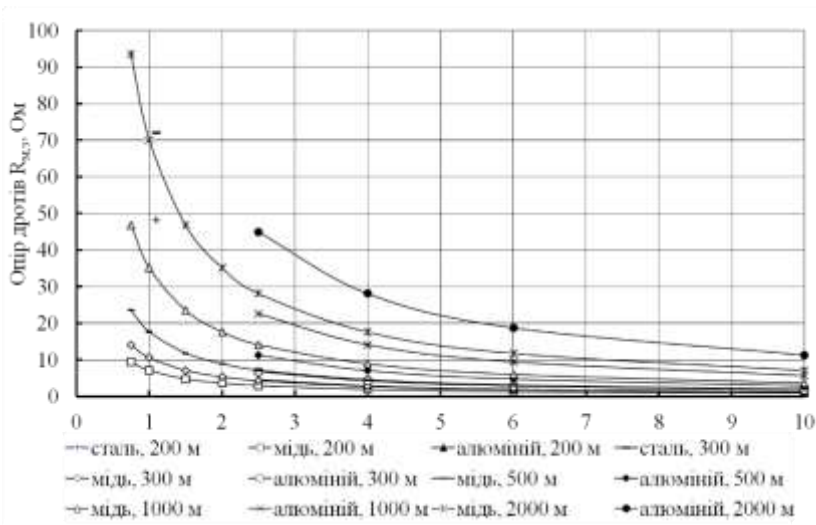


Рис. 2 – Залежність загального опору електропровідної мережі за паралельної схеми підключення в залежності від параметрів магістрального провідника.

Незалежно від схеми підключення отриманий загальний опір електропровідної мережі збільшується при переході матеріалу жили від міді до алюмінію і потім сталі, а також при збільшенні довжини дротів і зменшенні площі поперечного перерізу жили, що повністю узгоджується з закономірностями фізичних явищ. Близькість значень загального опору електропровідної мережі за паралельної та послідовної схем підключення пояснюється відсутністю врахування електричного опору самих детонаторів для залежностей представлених на рис. 1 та рис. 2. Однак, врахування схеми підключення для з'єднувальних дротів вносить не значні відмінності у значеннях загального опору наведених залежностей, бо магістральні дроти для обох схем мають однаковий електричний опір.

Сила струму в магістральному провіднику за послідовної схеми підключення електропровідної мережі детонаторів при проходженні тунелів залежно від матеріалу, довжини та площі поперечного перерізу його жили за напруги 380 В коливається в межах від 0,47 А до 1,15 А, а за напруги 220 В – від 0,27 А до 0,67 А. Така сила струму в магістральному провіднику не здатна забезпечити гарантійний струм, величина якого повинна становити не менше 2,5 А, не залежно від величини змінної напруги.

На рис. 3 та рис. 4 наведено залежності величини сили струму в магістральному провіднику паралельної електропровідної мережі детонаторів при проходженні тунелів від матеріалу, довжини та площі поперечного перерізу його жили за напруги 380 В та 220 В, відповідно. Характеристики з'єднувальних та детонаторних дротів в цьому випадку такі ж як і при визначенні опору дротів чи визначенні сили струму в магістральному провіднику за послідовної схеми приєднання детонаторів.

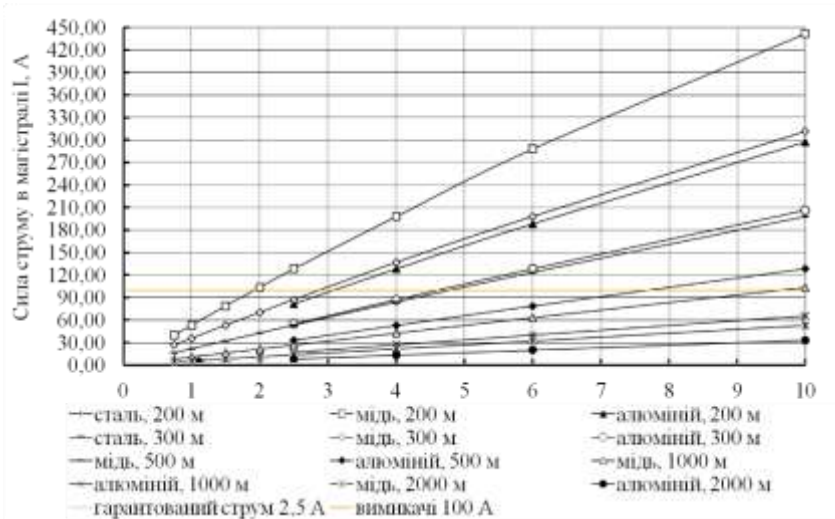


Рис. 3 – Залежність сили струму в магістральному провіднику електропровідної мережі при паралельній схемі підключення від його параметрів за змінної напруги 380 В.

Величина сили струму в мережі не залежно від послідовної чи паралельної схеми приєднання детонаторів зменшується при: переході жили проводу від міді до алюмінію і сталі або зменшенні її поперечного перерізу; збільшенні довжини дротів та збільшенні кількості детонаторів. Такі процеси повністю узгоджуються з загально-фізичними явищами.

Зменшення змінної напруги з 380 В до 220 В закономірно призводить до зменшення сили струму в магістральному провіднику. Мідна та алюмінієва жили повністю забезпечують гарантійний струм не менше 2,5 А в усьому дослідженому діапазоні параметрів провідника, крім використання мідної магістральної жили довжиною 2000 м та площею поперечного перерізу $0,75 \text{ мм}^2$ за напруги 220 В. Оцинкована сталь за поперечного перерізу в $1,1 \text{ мм}^2$ також не здатна забезпечити гарантований

струм при довжині магістрального провідника 500 м і більше та напрузі 220 В, а також при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 380 В (ці дані не винесені на графічне зображення рис. 3 та рис. 4 через інше потрібне масштабування шкал).

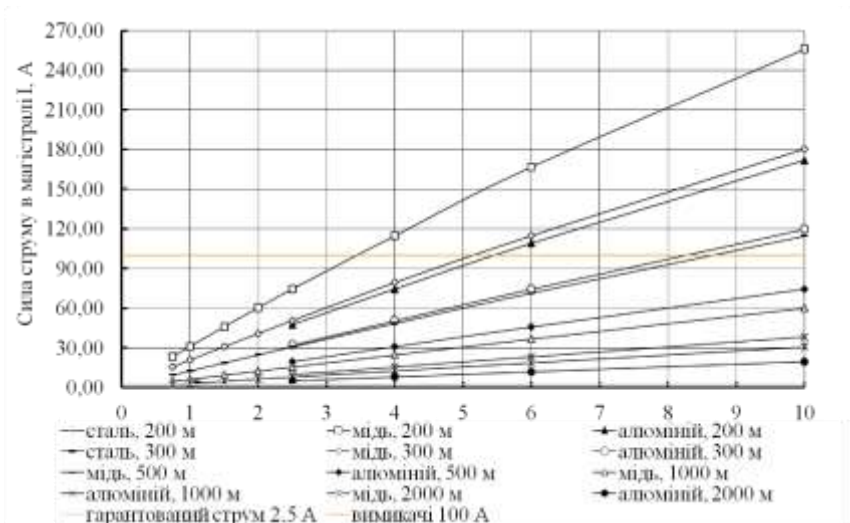


Рис. 4 – Залежність сили струму в магістральному провіднику електропровідної мережі при паралельній схемі підключення від його параметрів за змінної напруги 220 В.

Крім гарантованого струму в магістральному провіднику не залежно від послідовної чи паралельної схеми приєднання детонаторів в електричній мережі повинна бути забезпечена і інша умова, щодо не перевищення сили струму в мережі через приєднані різні контролюючі прилади та допоміжне обладнання, зокрема автоматичні промислові вимикачі. В основному вітчизняні та зарубіжні автоматичні вимикачі промислового призначення здатні витримувати силу струму яка б не перевищувала 100 А. Саме тому другою обмежувальною прямою на рис. 3 та рис. 4 крім гарантованого струму в 2,5 А позначено обмеження для автоматичних вимикачів в 100 А. Таким чином, користуючись рис. 3 та рис. 4, можна підбирати оптимальні параметри магістрального провідника, які гарантують потрібну силу струму від 2,5 А до 100 А за паралельного приєднання детонаторів та змінної напруги в 220 В та 380 В.

Висновки

Проведено огляд наукової літератури та наведено актуальні дослідження стосовно схем електричних мереж з'єднання детонаторів, що використовуються в тунельних вибухових роботах. На основі проведеного огляду поставлена мета та задачі дослідження щодо порівняння розрахункового опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах при послідовному і паралельному з'єднанні від параметрів дротів і їх довжини при проходженні тунелів. Сила струму в магістральному провіднику не здатна забезпечити гарантійний струм, величина якого повинна становити не менше 2,5 А, не залежно від величини розглянутої змінної напруги та за послідовно підключеної електричної мережі детонаторів. За паралельної схеми підключення мідна та алюмінієва жили не забезпечують гарантійний струм при використанні: мідної магістральної жили довжиною 2000 м та площею поперечного перерізу $0,75 \text{ мм}^2$ за напруги 220 В; оцинкованої сталі за поперечного перерізу в $1,1 \text{ мм}^2$ при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 380 В, а також при довжині магістрального провідника 500 м і більше та напрузі 220 В. При розробці великих тунелів одразу на всю площу поперечного перерізу, призначеного для залізничних тунелів з мінімум двома коліями або автомобільних доріг I та II технічних категорій, використання послідовної схеми підключення детонаторів неможливо, доцільно використання паралельної схеми.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що у нього немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи він не використовував технології штучного інтелекту.

References

1. Aivazov, Yu.M. (2005). Survey and design of mountain transport tunnels. (Vol. 1). Kyiv: NTU. ISBN 978-966-632-098-1. ISBN 978-966-632-098-1. [in Ukrainian].

2. Lapchenko, A.S. (2025). The influence of ground blast furnace slag and plasticizing additive on the strength properties of road concrete. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 23, 143-154. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-14](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14) [in Ukrainian].

3. Lapchenko, A.S. (2025). Disadvantages's evaluation of drilling and blasting works in various rock. *Collection of research papers of the National mining university*, 83 (4), 280-287. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.280> [in Ukrainian].

4. Symanovich, G.A., Khomenko, O.E., Kononenko, M.M. (2014). Destruction of rocks by explosion. *Dnipropetrovsk: NGU*. URL: https://www.researchgate.net/publication/322096252_RUJNUVANNA_GIRSKIH_PORI_D_VIBUHOM [in Ukrainian].

5. Aivazov, Yu.M., Pidgorny, O.V. (1998). *Methodological guidelines for the implementation of a course project in the discipline "Underground transport structures"*. Kyiv: UTU. URL: http://lib.ntu.edu.ua/catalog/page_lib.php [in Ukrainian].

6. Electric and non-electric detonators: what is the difference? Published in *Mining Industry: веб-сайт*. URL: <https://www.miningdoc.tech/2025/04/15/electric-and-non-electric-detonators-what-is-the-difference>

7. Zhang, Y., Zhou, J., Li, J. et al. (2025). Advancing overbreak prediction in drilling and blasting tunnel using MVO, SSA and HHO-based SVM models with interpretability analysis. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* Vol. 11. 53 (2025). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00963-1>

8. Cardu M., Martinelli D., Todaro C. (2024). *Industrial Explosives and their Applications for Rock Excavation*. London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group <https://doi.org/10.1201/9781003241973>

9. Shi J.-J., Guo S.-C., Zhang W. (2022). Expansion of Blast Vibration Attenuation Equations for Deeply Buried Small Clearance Tunnels Based on Dimensional Analysis. *Frontiers in Earth Science*. № 10. 889504. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.889504>

10. Silva J., Li L., Gernand J. M. Reliability analysis for mine blast performance based on delay type and firing time. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Volume 28. Issue 2. P. 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.07.004>

11. Study guide for the general blasters examination: Division of Mine Reclamation and Enforcement Explosives and Blasting Branch / Ed. M. Brashear. Kentucky: Institute of makers of explosives, 2011. – 76 p. URL: <https://eec.ky.gov/Natural-Resources/Mining/Reclamation-Enforcement/explosives-blasting.pdf>

12. Baryakhtar, V. G., Dovgy, S. O., Bozynova, F. Ya., Kiryukhina, O. O. (2019). *Physics*. Kharkiv: Publishing house "Ranok". ISBN 978-617-09-5236-3 [in Ukrainian].

Література

1. Вишукування і проектування гірських транспортних тунелів. В 3 ч. Ч. 1 / Ю.М. Айвазов. Київ: НТУ, 2005. 187 с. ISBN 978-966-632-098-1.

2. Лапченко А.С. Вплив меленого доменного шлаку та пластифікуючої добавки на міцнісні властивості дорожнього бетону. *Сучасні технології та*

методи розрахунків у будівництві. 2025. № 23. С. 143-154. DOI: [10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-14](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14)

3. Лапченко А.С. Оцінка недоліків проведення буровибухових робіт в різних гірських масивах. *Збірник наукових праць національного гірничого університету*. 2025. № 83 (4). С. 280-287. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.280>

4. Симанович Г.А., Хоменко О.Є., Кононенко М.М. Руйнування гірських порід вибухом: навч. посіб.. Дніпропетровськ: НГУ, 2014. 207 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/322096252_RUJNUVANNA_GIRSKIH_PORID_VIBUHNOM (дата звернення: 02.04.2026).

5. Айвазов Ю.М., Підгорний О.В. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Підземні транспортні споруди» для студентів спеціальності 2911 «Мости та транспортні тунелі». Київ: УТУ, 1998. 36 с. URL: http://lib.ntu.edu.ua/catalog/page_lib.php (дата звернення: 02.04.2026).

6. Electric and non-electric detonators: what is the difference? Published in Mining Industry: веб-сайт. URL: <https://www.miningdoc.tech/2025/04/15/electric-and-non-electric-detonators-what-is-the-difference> (дата звернення: 02.04.2026).

7. Zhang, Y., Zhou, J., Li, J. et al. Advancing overbreak prediction in drilling and blasting tunnel using MVO, SSA and ННО-based SVM models with interpretability analysis. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* 2025. Vol. 11. 53 (2025). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00963-1>

8. Cardu M., Martinelli D., Todaro C. Industrial Explosives and their Applications for Rock Excavation. London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2024. – 240 p. <https://doi.org/10.1201/9781003241973>

9. Shi J.-J., Guo S.-C., Zhang W. Expansion of Blast Vibration Attenuation Equations for Deeply Buried Small Clearance Tunnels Based on Dimensional Analysis. *Frontiers in Earth Science.* 2022. № 10. 889504. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.889504>

10. Silva J., Li L., Gernand J. M. Reliability analysis for mine blast performance based on delay type and firing time. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2018. Volume 28. Issue 2. P. 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.07.004>

11. Study guide for the general blasters examination: Division of Mine Reclamation and Enforcement Explosives and Blasting Branch / Ed. M. Brashear. Kentucky: Institute of makers of explosives, 2011. – 76 p. URL: <https://eec.ky.gov/Natural-Resources/Mining/Reclamation-Enforcement/explosives-blasting.pdf> (дата звернення: 02.04.2026).

12. Фізика: підруч. для 11 кл. закл. загал. серед. освіти / [Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О.] ; за ред. Бар'яхтара В. Г., Довгого С. О. — Харків : Вид-во «Ранок», 2019. — 272 с. ISBN 978-617-09-5236-3.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 08.04.2026	Received 08.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 08.04.2026	Received in revised form 08.04.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

A. S. Lapchenko*

Ph.D. in Engineering, Senior Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4037-5395>
Department of bridges, tunnels and hydraulic structures
National Transport University, St. M. Omelyanovycha-Pavlenko, 1, Kyiv, Ukraine, 02000

*corresponding author, e-mail: las83@ukr.net

Comparison of series and parallel electrodetonator network when passing tunnels

How to Cite:

Lapchenko, A. S. (2026). Comparison of series and parallel electrodetonator network when passing tunnels. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 25, 53-65, [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-04)

Abstract. Tunnel blasting is a complex engineering process that requires precise control of explosion initiation systems. Electric detonators are widely used in underground construction, where their connection scheme (serial, parallel) significantly affects: safety, efficiency and reliability. This paper presents a comparative analysis of serial and parallel electrical circuits for connecting electric detonators in tunnel conditions. The review of current research and scientific literature on the comparison electrical network's serial and parallel circuits of detonators used in tunnel blasting works is conducted. Based on the review, the goal and objectives of the study are set to calculate, construct and analyze the physical quantities' dependences of electric detonator network's serial and parallel circuits on their parameters when passing through tunnels. . The current strength in the main conductor is not able to provide a guarantee current, the value of which must be at least 2.5 A, regardless of the considered alternating voltage's value and the serially connected detonator's electrical network. With a parallel connection scheme, copper and aluminium conductors fully provide the guaranteed current in the main conductor at the entire range of its parameters under study, regardless of the alternating voltage's value when passing through tunnels, except for the use of a copper main conductor with a length of 2000 m and a cross-sectional area of 0.75 mm² at a voltage of 220 V. Galvanized steel with a cross-sectional area of 1.1 mm² is not able to provide the guaranteed current at the main conductor 1000 m length or more and the 380 V voltage, as well as at the main conductor 500 m length or more and the 220 V voltage. When developing large tunnels at once for the entire cross-sectional area intended for railway tunnels with at least two tracks or highways 10 m or more wide, the use of a serial connection scheme for detonators is impossible; it is advisable to use a parallel scheme. The results may be useful for engineers when selecting initiation systems.

Keywords: aluminium, copper, current strength, detonator, galvanized steel, series and parallel electrodetonator network, tunnel, wire resistance.

УДК 624.04; 624.073; 624.15

О. Ю. Єрьоменко*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4030-9438>

Кафедра промислового, цивільного і міського будівництва
Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027

С. В. Стоянович

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1363-7356>

Кафедра архітектурних конструкцій
Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, Вознесенський узвіз, 20, м. Київ, Україна, 04053

*автор-кореспондент, e-mail: eremenko.oy@knu.edu.ua

Порівняльний аналіз чисельних методів розрахунку гнучких фундаментних плит на пружній основі з урахуванням геометричної нелінійності

Цитувати як:

Єрьоменко, О. Ю., Стоянович, С. В. (2026). Порівняльний аналіз чисельних методів розрахунку гнучких фундаментних плит на пружній основі з урахуванням геометричної нелінійності. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 66-75. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-05](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-05)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті наведено результати порівняльного аналізу ефективності та точності чисельних методів при розв'язанні задач будівельної механіки, зокрема при розрахунку гнучких фундаментних плит, що взаємодіють із пружною основою. Актуальність дослідження зумовлена сучасними тенденціями у будівництві великопрольотних та висотних споруд, де використання тонких фундаментних плит призводить до виникнення значних прогинів, сумірних із товщиною самої конструкції. У таких випадках класична лінійна теорія розрахунку дає суттєву похибку, що вимагає застосування геометрично нелінійного апарату, заснованого на системі диференціальних рівнянь Теодора фон Кармана. В якості математичної моделі взаємодії плити з ґрунтом використано класичну однопараметричну модель Вінклера. Основна увага у роботі приділяється порівнянню двох сіткових методів: узагальненого методу скінченних різниць (MCP) та методу послідовних апроксимацій (МПА), специфіка якого полягає у застосуванні кусково-поліноміальних функцій (сплайнів) для побудови матриць диференціювання. Для реалізації алгоритмів авторами використано обчислювальні програми для середовища MATLAB, що дозволяють здійснювати ітераційний процес пошуку нелінійного розв'язку. У ході дослідження виконано розрахунок квадратної фундаментної плити, жорстко заземленої по контуру, під дією рівномірно розподіленого навантаження. Проведено серію обчислень на сітках різної густоти (від кроку $h=1/4$ до $h=1/64$). На першому етапі отримані

результати зіставлені з класичними аналітичними розв'язками нелінійної теорії пластин без урахування основи. Доведено, що метод послідовних апроксимацій (МПА) демонструє вищу швидкість збіжності та кращу точність на рідких розрахункових сітках порівняно з класичним МСР. Зокрема, розбіжність максимальних прогинів за МПА становить менше 3% вже при кроці сітки $h=1/16$, тоді як для досягнення аналогічної точності в МСР потрібне подальше згушення сітки. На другому етапі чисельно досліджено поведінку цієї ж плити за умови її спирання на суцільну пружну основу. Встановлено, що врахування відсічі ґрунту за моделлю Вінклера призводить до зменшення максимальних прогинів конструкції в середньому на 15 % порівняно з плитою без основи. При цьому алгоритм МПА зберігає свою обчислювальну стійкість, забезпечуючи стабілізацію значень переміщень та згинальних моментів вже на сітці $h=1/16$ без накопичення похибок, характерних для МСР у зонах крайових ефектів. Результати дослідження підтверджують доцільність використання алгоритмів МПА у програмних комплексах автоматизованого проєктування будівельних конструкцій для підвищення надійності оцінки напружено-деформованого стану фундаментів за наявності геометричної нелінійності.

Ключові слова: будівельна механіка, фундаментна плита, геометрична нелінійність, рівняння Кармана, пружна основа Вінклера, метод послідовних апроксимацій, метод скінченних різниць.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Сучасне будівництво характеризується ускладненням архітектурно-конструктивних форм споруд та прагненням до зниження їх матеріаломісткості. Це призводить до широкого використання тонких і гнучких елементів, зокрема фундаментних плит. Під дією експлуатаційних навантажень такі конструкції отримують переміщення (прогини), які є сумірними з їхньою товщиною. У такому стані в серединній площині плити виникають мембранні зусилля, і розрахунок за лінійною теорією Кірхгофа-Лява призводить до неадекватної оцінки напружено-деформованого стану (НДС) [1, 2]. Достовірний прогноз поведінки конструкції можливий лише з урахуванням геометричної нелінійності, що в будівельній механіці описується системою диференціальних рівнянь фон Кармана.

Математичне моделювання взаємодії таких плит із ґрунтовим масивом найчастіше виконується з використанням пружної основи типу Вінклера [5]. Розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних четвертого порядку для таких задач аналітичними методами є складним завданням, особливо при комбінованих граничних умовах [4, 6].

Одним із найпоширеніших підходів до вирішення практичних задач будівельної механіки є використання чисельних методів: методу скінченних елементів (МСЕ), безсіткових методів (Meshless methods) та методу скінченних різниць (МСР) [2, 7]. Сучасні міжнародні дослідження

доводять, що МСР залишається потужним інструментом завдяки простоті алгоритмізації. Однак класичний МСР має суттєвий недолік — швидке накопичення числової похибки при збільшенні прогинів («проблема мембранного блокування») та високу чутливість до розривних функцій (наприклад, при стрибкоподібній зміні жорсткості основи) [7].

Дієвою математичною альтернативою виступає метод послідовних апроксимацій (МПА), розвинений у рамках вдосконалення сіткових сплайн-методів [3]. Завдяки використанню кусково-поліноміальних функцій, матриці диференціювання МПА дозволяють отримувати високу точність розрахунків на розріджених сітках. Проте у відкритій науковій літературі відсутній детальний порівняльний аналіз ефективності узагальненого МСР та МПА при розв'язанні сумісної задачі нелінійного згину плит на пружній основі, що обґрунтовує актуальність даної теми досліджень.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення надійності розрахунків просторових будівельних конструкцій шляхом виконання комплексного порівняльного аналізу ефективності та точності узагальненого методу скінченних різниць (МСР) та методу послідовних апроксимацій (МПА) на прикладі задачі геометрично нелінійного згину гнучкої фундаментної плити на пружній основі.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні завдання:

1. Адаптувати математичну модель взаємодії гнучкої прямокутної плити з пружною основою Вінклера у безрозмірних координатах для чисельної реалізації обома сітковими методами.

2. Провести серію тестових чисельних розрахунків (із застосуванням алгоритмів у середовищі MATLAB) нелінійного згину защемленої плити з використанням МСР та МПА на розрахункових сітках різної густоти.

3. Виконати порівняльний аналіз отриманих результатів, оцінити швидкість збіжності ітераційних процесів та визначити похибки методів порівняно з еталонними аналітичними розв'язками.

Матеріали та методи

Теоретичною основою дослідження є система нелінійних диференціальних рівнянь згину гнучких пластин (рівняння фон Кармана), адаптована для випадку взаємодії з пружною основою моделі Вінклера [1, 5]. Математична модель у декартовій системі координат має вигляд:

$$D\nabla^2\nabla^2\omega = \frac{\delta^2\Phi}{\delta y^2} \frac{\delta^2\omega}{\delta x^2} + \frac{\delta^2\Phi}{\delta x^2} \frac{\delta^2\omega}{\delta y^2} - 2 \frac{\delta^2\Phi}{\delta x\delta y} \frac{\delta^2\omega}{\delta x\delta y} + q - K\omega; \quad (1)$$

$$\frac{1}{E} \nabla^2 \nabla^2 \Phi = \left(\frac{\delta^2 \Phi}{\delta x \delta y} \right)^2 - \frac{\delta^2 \omega}{\delta x^2} \frac{\delta^2 \omega}{\delta y^2}, \quad (2)$$

де ω – прогин плити; Φ – функція напружень у серединній площині; D – циліндрична жорсткість; E – модуль пружності; q – інтенсивність поперечного навантаження; K – коефіцієнт постелі пружної основи; ∇^2 – оператор Лапласа.

Для зручності чисельного розв'язання вихідну систему зведено до безрозмірного вигляду (шляхом введення безрозмірних координат $\xi = x/a$, $\eta = y/a$ та функцій $\bar{\omega} = \omega/H$, $\psi = \Phi H/D$) і штучно розщеплено на систему чотирьох диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\begin{cases} \frac{\delta^2 m}{\delta \xi^2} + \frac{\delta^2 m}{\delta \eta^2} = -(g - K\bar{\omega}); \\ \frac{\delta^2 \bar{\omega}}{\delta \xi^2} + \frac{\delta^2 \bar{\omega}}{\delta \eta^2} = -m; \\ \frac{\delta^2 f}{\delta \xi^2} + \frac{\delta^2 f}{\delta \eta^2} = -\alpha; \\ \frac{\delta^2 \psi}{\delta \xi^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta \eta^2} = -f; \end{cases} \quad (3)$$

де m та f - допоміжні функції; g та α – параметри, що містять нелінійні складові.

Для розв'язання цієї системи застосовано два чисельні підходи: узагальнений МСР та метод послідовних апроксимацій (МПА). На відміну від класичного різницевого методу, у методі МПА при побудові матриць диференціювання використовуються кусково-поліноміальні функції (сплайни). Алгоритми реалізовано за ітераційною схемою у пакеті MATLAB. На першому кроці розв'язується лінійна задача, після чого обчислюються нелінійні складові. Ітераційний процес триває до досягнення збіжності з точністю $\Delta < 0,001$.

Схема розрахункової моделі на рис. 1 показує квадратну фундаментну плиту, жорстко защемлену по всьому контуру, із краями, що

вільно зближуються у горизонтальній площині. Плита всією площею спирається на пружну основу.

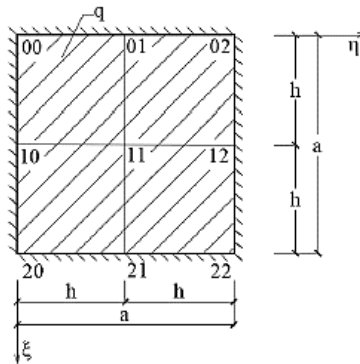


Рис. 1. Схема розрахункової моделі гнучкої квадратної плити на пружній основі

Для виконання порівняльного аналізу було обрано тестову задачу з такими фізико-механічними характеристиками: товщина плити $H = 0,1$ см, довжина сторони $a = 10$ см, $E = 0,75 \cdot 10^6$ кг/см², коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,316$. Плита навантажена рівномірно розподіленим навантаженням $q = 0,5$ кг/см². Коефіцієнт постелі прийнято $K = 2,15$ кг/см³. Серії чисельних експериментів виконано на вкладених сітках з різним кроком розбиття: $h = 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64$.

Результати та обговорення

Для об'єктивної оцінки ефективності методів виконано серію чисельних експериментів. На першому етапі проводилося порівняння швидкості збіжності МПА та МСР на класичній задачі нелінійного згину защемленої гнучкої плити без урахування пружної основи.

Отримані у табл. 1 дані показують, що обидва методи при згущенні сітки прямують до єдиного розв'язку, однак характер їхньої збіжності суттєво відрізняється.

Аналіз даних Таблиці 1 свідчить, що на грубих розрахункових сітках ($h = 1/4$ та $h = 1/8$) класичний МСР дає значну похибку (завищення прогинів), що пов'язано з недостатньою точністю апроксимації змішаних похідних. Натомість МПА, завдяки використанню сплайн-функцій, демонструє високу стабільність: вже при кроці $h = 1/16$ результат відрізняється від еталонного (наведеного у фундаментальних працях з нелінійної теорії пластин [1]) менш ніж на 3%. При кроці $h = 1/32$ результати обох методів практично збігаються.

Таблиця 1. Порівняння максимальних прогинів W_{\max} (см) защемленої плити

Крок сітки h	Результат за МПА	Результат за МСР	Відхилення МПА від МСР, %	Похибка МПА відносно аналітичного розв'язку*, %
1/4	0,0750	0,0990	24,2	7,12
1/8	0,0764	0,0850	10,1	5,39
1/16	0,0778	0,0802	3,0	3,65
1/32	0,0782	0,0788	0,7	3,28
1/64	0,0782	0,0783	0,1	3,28

*Примітка: Еталонний аналітичний розв'язок для заданих параметрів становить $W_{\max}=0,08075$ см [1].

На другому етапі дослідження алгоритм МПА було застосовано до розрахунку тієї ж плити, але з урахуванням суцільного контакту з пружною основою Вінклера (табл. 2).

Таблиця 2. Вплив пружної основи на максимальні прогини плити W_{\max} (см) за МПА

Крок сітки h	Без пружної основи	На суцільній пружній основі	Зниження прогину, %
1/4	0,0750	0,0650	13,3
1/8	0,0764	0,0654	14,4
1/16	0,0778	0,0661	15,0
1/32	0,0782	0,0663	15,2
1/64	0,0782	0,0664	15,1

Математична обробка отриманих даних дозволила виявити закономірність: наявність пружної основи із заданим коефіцієнтом постелі знижує максимальний нелінійний прогин фундаментної плити в середньому на 15% порівняно з плитою без основи. При цьому алгоритм МПА зберігає свою ключову перевагу – швидку збіжність. Значення прогину стабілізується вже при кроці сітки $h = 1/16$, і подальше згущення сітки до $h = 1/64$ змінює результат лише на 0,4%.

Окрім переміщень, порівняльний аналіз показав високу чутливість МСР до обчислення згинальних моментів поблизу жорсткого защемлення, де виникають крайові ефекти. Використання МПА дозволило отримати

фізично достовірні епюри згинальних моментів без необхідності локального згущення сітки в кутових точках плити.

Детальніший аналіз напружено-деформованого стану дозволив виявити ще одну суттєву перевагу методу послідовних апроксимацій (МПА). Окрім оцінки вертикальних переміщень, критично важливим етапом проектування фундаментних плит є точне визначення внутрішніх зусиль – згинальних моментів M_x та M_y . Класичний метод скінченних різниць (МСР) обчислює моменти через другі похідні, виражені через скінченні різниці від прогинів. У зонах жорсткого заземлення плити (де прогин і кут повороту дорівнюють нулю) виникають значні градієнти зусиль, так звані крайові ефекти. Для їх адекватного опису МСР вимагає введення «законтурних» (фіктивних) вузлів та різкого локального згущення сітки, що суттєво ускладнює алгоритм та збільшує загальний час комп'ютерного розрахунку.

Натомість, застосування МПА зі сплайн-апроксимацією дозволяє успішно обійти цю проблему. Оскільки допоміжні функції m та f (які є аналогами згинальних моментів та параметрів кривизни у перетвореній системі диференціальних рівнянь) обчислюються в МПА безпосередньо у вузлах сітки через інтегральні та диференціальні співвідношення, алгоритм формує неперервні та гладкі епюри моментів навіть на розрідженій розрахунковій сітці $h = 1/16$. Врахування пружної основи Вінклера, як було показано вище, хоч і призводить до зменшення максимальних прогинів, проте одночасно викликає перерозподіл згинальних моментів від центру плити до її опорних контурів. Метод послідовних апроксимацій дозволяє коректно та без осциляцій зафіксувати цей перерозподіл напружень без втрати обчислювальної стійкості, що вчоргове підтверджує його високу ефективність для інженерної практики.

Висновки

Були розглянуті два чисельні підходи до розв'язання задачі будівельної механіки щодо нелінійного згину гнучких фундаментних плит на пружній основі. Були отримані наступні результати:

1. Показано, що при розв'язанні системи нелінійних рівнянь фон Кармана метод послідовних апроксимацій (МПА) має суттєву перевагу над узагальненим методом скінченних різниць (МСР) у швидкості збіжності ітераційного процесу.

2. Встановлено, що МПА забезпечує високу точність розрахунків на грубих сітках ($h = 1/8$ та $h = 1/16$), де класичний МСР дає похибку від 10% до 24%. Це дозволяє значно економити машинні ресурси при проектуванні складних фундаментних конструкцій у САПР.

3. Чисельно підтверджено, що врахування відсічі пружної основи Вінклера знижує максимальні прогини гнучкої защемленої плити на 15%. Алгоритми МПА коректно враховують цей фактор без втрати стійкості обчислювального процесу.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Chia, C. Y. (1980). *Nonlinear analysis of plates*. McGraw-Hill International Book Co.
2. Civalek, Ö. (2007). Discrete singular convolution method for the analysis of Mindlin plates on elastic foundations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84(9), 527-535. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.07.001>
3. Dao, N. K., Gabbasov, R., Quyen, H. T. L., & Nguyen, L. T. (2020). Comparison of calculation results of flexible plates on the basis of difference equations of successive approximation method and generalized equations of finite difference method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 913(2), 022002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/2/022002>
4. Katsikadelis, J. T. (1991). Large deflection analysis of plates on elastic foundation by the boundary element method. *International Journal of Solids and Structures*, 27(15), 1867-1878. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(91\)90182-F](https://doi.org/10.1016/0020-7683(91)90182-F)
5. Selvadurai, A. P. S. (1979). *Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction*. Elsevier Scientific Publishing Company.
6. Shen, H. S. (2000). Nonlinear bending of simply supported rectangular Reissner–Mindlin plates under transverse and in-plane loads and resting on elastic foundations. *Engineering Structures*, 22(7), 847-856. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(99\)00044-9](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(99)00044-9)
7. Yu, Q., Xu, H., & Liao, S. (2018). Nonlinear analysis for extreme large bending deflection of a rectangular plate on non-uniform elastic foundations. *Applied Mathematical Modelling*, 61, 316-340. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.04.022>

Література

1. Chia, C. Y. (1980). *Nonlinear analysis of plates*. McGraw-Hill International Book Co.
2. Civalek, Ö. (2007). Discrete singular convolution method for the analysis of Mindlin plates on elastic foundations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84(9), 527-535. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.07.001>
3. Dao, N. K., Gabbasov, R., Quyen, H. T. L., & Nguyen, L. T. (2020). Comparison of calculation results of flexible plates on the basis of difference equations of successive approximation method and generalized equations of finite difference method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 913(2), 022002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/2/022002>
4. Katsikadelis, J. T. (1991). Large deflection analysis of plates on elastic foundation by the boundary element method. *International Journal of Solids and Structures*, 27(15), 1867-1878. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(91\)90182-F](https://doi.org/10.1016/0020-7683(91)90182-F)
5. Selvadurai, A. P. S. (1979). *Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction*. Elsevier Scientific Publishing Company.
6. Shen, H. S. (2000). Nonlinear bending of simply supported rectangular Reissner-Mindlin plates under transverse and in-plane loads and resting on elastic foundations. *Engineering Structures*, 22(7), 847-856. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(99\)00044-9](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(99)00044-9)
7. Yu, Q., Xu, H., & Liao, S. (2018). Nonlinear analysis for extreme large bending deflection of a rectangular plate on non-uniform elastic foundations. *Applied Mathematical Modelling*, 61, 316-340. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.04.022>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 20.04.2026	Received 20.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 09.05.2026	Received in revised form 09.05.2026
Прийнято 27.05.2025	Accepted 27.05.2025
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

A. Yu. Eremenko*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4030-9438>
Department of Industrial, Civil and Urban Construction
Kryvyi Rih National University, Vitalii Matuselych St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027

S. V. Stoianovych

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1363-7356>
Department of Architectural Structures
National Academy of Fine Arts and Architecture, Voznesenskyi Descent, 20, Kyiv, Ukraine, 04053

*corresponding author, e-mail: eremko.oy@knu.edu.ua

Comparative analysis of numerical methods for calculating flexible foundation plates on an elastic foundation taking into account geometric nonlinearity

How to Cite:

Eremenko, A. Yu., Stoianovych, S. V. (2026). Comparative analysis of numerical methods for calculating flexible foundation plates on an elastic foundation taking into account geometric nonlinearity. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 66-75. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-05](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-05)

Abstract. The article presents the results of a comparative analysis of the efficiency and accuracy of numerical methods in solving problems of structural mechanics, in particular, in calculating flexible foundation plates interacting with an elastic foundation. The relevance of the study is justified by modern trends in the construction of large-span and high-rise buildings, where the use of thin foundation plates leads to significant deflections commensurate with the thickness of the structure itself. In such cases, the classical linear calculation theory yields a significant error, which requires the use of a geometrically nonlinear apparatus based on the system of Theodore von Karman differential equations. The classical one-parameter Winkler model is used as a mathematical model of the interaction of the plate with the soil. The main focus of the work is on comparing two grid methods: the generalized finite difference method (FDM) and the successive approximation method (SAM), the specificity of which lies in the use of piecewise polynomial functions (splines) to construct differentiation matrices. To implement the algorithms, the authors developed computational programs in the MATLAB environment, which allow performing the iterative process of finding a nonlinear solution. During the study, a square foundation plate, rigidly clamped along the contour, under the action of a uniformly distributed load was calculated. A series of calculations were carried out on grids of varying density (from a step of $h=1/4$ to $h=1/64$). At the first stage, the obtained results were compared with classical analytical solutions of the nonlinear plate theory without considering the foundation. It has been proven that the successive approximation method (SAM) demonstrates a higher convergence rate and better accuracy on coarse computational grids compared to the classical FDM. In particular, the discrepancy of the maximum deflections for the SAM is less than 3% even at a grid step of $h=1/16$, while to achieve similar accuracy in the FDM, further grid refinement is required. At the second stage, the behavior of the same plate resting on a continuous elastic foundation was numerically investigated. It was found that taking into account the soil subgrade reaction using the Winkler model leads to a decrease in the maximum deflections of the structure by an average of 15% compared to the plate without a foundation. At the same time, the SAM algorithm maintains its computational stability, ensuring the stabilization of displacements and bending moments already on the $h=1/16$ grid without the accumulation of errors typical for the FDM in the zones of edge effects. The research results confirm the feasibility of using SAM algorithms in computer-aided design (CAD) software for building structures to increase the reliability of assessing the stress-strain state of foundations in the presence of geometric nonlinearity.

Keywords: structural mechanics, foundation plate, geometric nonlinearity, von Karman equations, Winkler elastic foundation, successive approximation method, finite difference method.

УДК 691.542

О. І. Кротюк*

Аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2712-8644>

Кафедра технології будівельних виробів та матеріалознавства

Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, Рівне, Україна, 33028

Л. Й. Дворкін

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8759-6318>

Кафедра технології будівельних виробів та матеріалознавства

Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, Рівне, Україна, 33028

*автор-кореспондент, e-mail: o.i.krotyuk@nuwm.edu.ua

Ефективність комплексної добавки на основі суперпластифікатора та інтенсифікатора помелу для тампонажного цементу

Цитувати як:

Кротюк О. І., Дворкін Л. Й. (2026). Ефективність комплексної добавки на основі суперпластифікатора та інтенсифікатора помелу для тампонажного цементу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 76-87. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-06](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-06)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті наведено результати дослідження ефективності комплексної добавки, що містить полікарбоксилатний суперпластифікатор та інтенсифікатор помелу під час виробництва тампонажного цементу в кульовому цементному млині. Встановлено кількісні режимні показники помелу та основні властивості тампонажного цементу. Визначено загальні напрямки покращення процесу помелу тампонажного цементу. Представлено загальну тенденцію інтенсифікування процесу помелу цементу при використанні різних комбінацій компонентів добавки опираючись на показник питомої поверхні цементу. Визначено шляхи зниження водовідділення водовідділення тампонажного цементу при комплексній дії композиції добавок. Представлено можливі шляхи зниження водоцементного відношення при достатньому розтіканні тампонажного цементного розчину та забезпеченні його пластичних властивостей. Визначено, що поєднання суперпластифікатора у кількості 0,05% та пропілендіколю 0,1 % від маси цементу дає можливість досягти низький показник водовідділення при розтіканні цементного тіста до 260 мм. Отримані результати дають можливість зменшувати кількість води для замішування на 20 %. Представлено динаміку зміни міцнісних показників цементного розчину при різних комбінаціях досліджених добавок. Введення запропонованих добавок під час помелу забезпечує достатню однорідність змішування з цементом. Опіраючись на результати

дослідження можна зробити висновок, що введення запропонованої комплексної добавки може слугувати одночасно як інтенсифікатор помелу і модифікатор основних властивостей тампонажного цементу.

Ключові слова: тампонажний цемент, питома поверхня, суперпластифікатор, пропіленгліколь, водовідділення, розтікання.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Існуючі публікації у наукових виданнях, вітчизняного та закордонного авторства, для пониження водовідділення портландцементу тампонажного (ПЦТІ-100) розглядають введення добавок у вигляді відходів хімічної промисловості [1], модифікованих поліфункціональних сполук, метакаоліну та цеоліту, золи-виносу, марганцевої руди [2], поліпропіленових волокон [3], полімерів на основі целюлози [4]. Однак введення будь яких добавок у виробничих умовах під час помелу цементу або вже після його приготування має ряд ризиків. Одним з них є нестабільність хімічного складу добавок, так як ці добавки зазвичай є відходами інших виробництв.

Водовідділення є одним з основних показників якості тампонажного тіста, так як вільна вода може рухатись по обсадній колоні в свердловині та утворювати канали та капіляри по яких в подальшому може рухатись газ і таким чином руйнується загальна бетонна конструкція обсадної колони. Згідно нормативних вимог ДСТУ Б В.2.7-88-99 [5] водовідділення тампонажного цементу має бути не більше 8,7 мл. Тампонажний цемент в ідеальних параметрах повинен мати показник водовідділення який наближається до 0. Поряд з цим тампонажне тісто повинне мати достатнє розтікання, не менше 200 мм [5], яке дасть змогу вільно закачатись (поступити) в обсадну колону на значну глибину. При промисловому виробництві тампонажного цементу бажаним компонентом має бути інтенсифікатор помелу для стабільності роботи цементного млина, регулювання тонини помелу та питомої поверхні цементу.

Тому, виходячи з вище викладеного, виникає потреба в розробці комплексних рішень по зменшенню водовідділення готового тампонажного тіста з дотриманням достатнього показника розтікання та підвищенням міцності на згин. Таким чином актуальною є проблема поєднання процесу помелу цементу з додаванням добавок, які мали б інтенсифікуючий ефект для оптимізації виробництва готового тампонажного цементу та одночасно позитивно впливали на комплекс нормованих властивостей.

Мета і завдання дослідження. Проведення аналізу впливу комплексної добавки, що містить суперпластифікатор та інтенсифікатор помелу на основні показники готового тампонажного цементу.

Матеріали та методи

У роботі використано метод порівняльного аналізу досліджень проведених на лабораторному кульовому млині з використанням різних компонентів для оцінки їх впливу на процес помелу та властивості цементу. Досліди були поділені на 5 циклів. Для дослідження використовували клінкер (К), мінералогічний склад якого коливався в межах $C_3S - 54,18\%$; $C_2S - 26,84\%$; $C_3A - 2,2\%$; $C_4AF - 11,75\%$ та гіпсовий камінь (Г) з вмістом двоводного гіпсу $94,2\%$. При помелі для всіх циклів дослідів використовували однакову кількість гіпсового каменю в кількості 5% ($3,2\% SO_3$), інші 95% від маси був клінкер. В якості суперпластифікатора (С) використовувався сухий концентрат полікарбоксилатного суперпластифікатора 3-го покоління «LitoПласт-ПСК/Л» з вмістом основної речовини $97,2\%$. Згідно попередніх досліджень [6] відсоток вводу суперпластифікатора прийняли $0,05\%$ від маси цементу. Другим компонентом використовували пропіленгліколь (П) з вмістом основної речовини $99,9\%$. Згідно виробничих напрацювань відсоток вводу пропіленгліколя прийняли $0,1\%$. Інтенсифікуючий ефект визначали методом аналізу цементу на питому поверхню взятого після 40, 55 та 65 хвилин часу помелу. Водовідділення та розтікання визначали згідно методик ДСТУ [7]. Міцності визначали згідно ДСТУ [8].

Результати та обговорення

Під час помелу цементу використовувались різні компоненти та комбінації добавок, що наведені в табл. 1. Виконані 4 цикли дослідів зі зміною складу цементу та тривалістю помелу. В першому циклі помелу не використовувались жодні добавки для порівняння з результатами отриманими в інших циклах помелу.

З результатів отриманих в першому циклі помелу видно як змінюється питома поверхня цементу від $2684 \text{ см}^2/\text{г}$ при часу помелу 40 хв до $3481 \text{ см}^2/\text{г}$ при часі помелу 65 хв з проміжним аналізом при часі помелу 55 хв та питомою поверхнею $3107 \text{ см}^2/\text{г}$.

В другому циклі помелу до клінкеру та гіпсу додавали $0,05\%$ полікарбоксилатного суперпластифікатора. Як видно з табл. 2 питома поверхня у всіх трьох часових точках незначно змінюється у порівнянні з першим циклом експерименту – $2676 \text{ см}^2/\text{г}$, $3095 \text{ см}^2/\text{г}$ та $3385 \text{ см}^2/\text{г}$ відповідно, та є в межах похибки приладу вимірювання питомої поверхні.

Аналізуючи два цикли дослідів можна стверджувати, що введення суперпластифікатора не впливає на зростання питомої поверхні.

Таблиця 1. Результати експериментів

№ циклу дослідів	Складові компоненти	Час помелу, хв	Питома поверхня цементу, см ² /г
1	Клінкер, 4750 г, гіпсовий камінь, 250 г	40	2684
		55	3107
		65	3481
2	Клінкер, 4750 г, гіпсовий камінь, 250 г, суперпластифікатор 0,05%	40	2676
		55	3095
		65	3385
3	Клінкер, 4750 г, гіпсовий камінь, 250 г, пропіленгліколь 0,1%	40	2724
		55	3371
		65	3881
4	Клінкер, 4750 г, гіпсовий камінь, 250 г, суперпластифікатор, 0,05%, пропіленгліколь 0,1%	40	2917
		55	3432
		65	3615

У табл. 2 приведені порівняльні показники питомої поверхні та їх різниця для перших двох циклів помелу. Різниця питомої поверхні, як видно з табл. 2, через однаковий час помелу для першого та другого циклу помелу коливається в межах похибки приладу Блейн. Як висновок порівняння даних двох циклів дослідів є те, що суперпластифікатор ніяк не впливає на показник питомої поверхні і його не можна вважати компонентом який інтенсифікує помел.

Таблиця 2. Порівняння результатів перших двох циклів помелу

Час помелу, хв	Питома поверхня цементу, см ² /г		
	Цикл №1, К+Г	Цикл №2, К+Г+С	Різниця
40	2684	2676	8
55	3107	3095	12
65	3481	3385	96

В третьому циклі помелу до клінкеру та гіпсового каменю додавали пропіленгліколь в кількості 0,1% від маси. Як видно з табл. 1 питома

поверхня цементу в ході циклу помелу змінювалась від 2724 см²/г при 40 хв помелу та 3371 см²/г при 55 хв помелу до 3881 см²/г при 65 хв помелу. Порівнюючи даний цикл дослідів з першим циклом (без будь-яких добавок) можна побачити, що інтенсифікація помелу на перших 40-ка хвилинах помелу майже не відбувається. Починаючи з 55-ї хвилини помелу видно, що питома поверхня цементу зросла на 264 см²/г (8%), а на 65-й хвилині - на 400 см²/г (10,3%). Дані представлені в табл. 3.

Таблиця 3. Порівняння результатів третього та першого циклів помелу

Час помелу, хв	Питома поверхня цементу, см ² /г		
	Цикл №3, К+Г+П	Цикл №1, К+Г	Різниця
40	2724	2684	40
55	3371	3107	264
65	3881	3481	400

У четвертому циклі помелу цементу використовували комплекс добавок: суперпластифікатор та пропіленгліколь в кількостях 0,05% та 0,1% відповідно. Як видно з табл. 4 питома поверхня цементу змінювалась з 2917 см²/г при 40 хв помелу, 3432 см²/г при 55 хв помелу та 3615 см²/г при 65 хв помелу.

Таблиця 4. Порівняння результатів четвертого циклу з першим, другим та третім

Час помелу, хв	Питома поверхня цементу, см ² /г		
	Цикл №4, К+Г+С+П	Цикл №1, К+Г	Різниця
40	2917	2684	233
55	3432	3107	325
65	3615	3481	134
	Цикл №4, К+Г+С+П	Цикл №2, К+Г+С	
40	2917	2676	241
55	3432	3095	337
65	3615	3385	230
	Цикл №4, К+Г+С+П	Цикл №3, К+Г+П	
40	2917	2724	193
55	3432	3371	61
65	3615	3881	-266

Порівнюючи результати четвертого циклу помелу з першим циклом бачимо суттєву різницю питомої поверхні і відповідно бачимо інтенсифікуючий ефект за рахунок введення пропіленгліколю в присутності суперпластифікатора, що наведено в табл. 4.

Порівнюючи результати четвертого циклу експерименту з другим циклом (з додаванням тільки суперпластифікатора) видно, що присутня тенденція зростання питомої поверхні близько 240-340 $\text{см}^2/\text{г}$ (8%) в кожному часовому проміжку, що показує значний інтенсифікуючий ефект при поєднанні двох добавок.

Порівнюючи результати четвертого циклу з третім циклом експерименту (з додаванням тільки пропіленгліколю) видно, що питома поверхня в обох експериментах змінювалась не значно. Деяке зниження питомої поверхні при підвищеній тривалості помелу можна пояснити незначною агрегуючою здатністю добавки, що видно з табл. 4.

Порівняльні параметри питомої поверхні наведені на рис. 1.

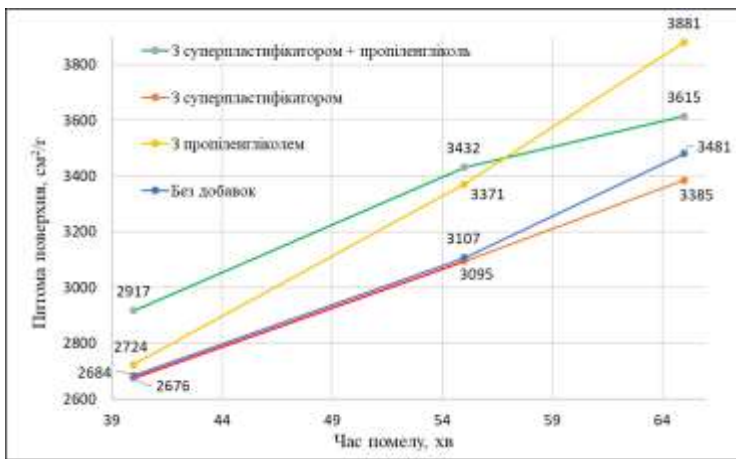


Рис. 1. Графік зміни питомої поверхні від часу помелу

У табл. 5 представлені розширені результати чотирьох циклів експериментів в часовій точці 65 хв.

Як видно з табл. 5 розтікання при використанні добавки тільки пропіленгліколю дорівнює 160 мм, що є негативним результатом, так як нормований показник має бути не менше 200 мм [7]. Без використання будь-яких добавок показник розтікання становить 200 мм з водовідділенням 8,0 мл, що є доволі хорошим показником, але 200 мм є нижнім граничним числом. При додаванні тільки суперпластифікатора в третьому циклі дослідів видно, що показник розтікання є 270 мм, що

являється дуже хорошим показником та робить це цементне тісто пластичним, але показник водовідділення при цьому склав 14,0 мл, що є значним показником і не вкладається в існуючі норми.

Таблиця 5. Результати досліджень циклів експериментів

Номер циклу дослідження	Умовне позначення складу компонентів	Розтікання, мм	Водовідділення, мл	Питома поверхня цементу, см ² /г	Час загуснення до консистенції 30 Вс, хв	Міцність на згин у віці 1 доба, МПа	Міцність на стиск у віці 2 доби, МПа	Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа
1	К+Г	200	8,0	3481	145	6,17	32,07	46,76
2	К+Г+С	270	14,0	3385	175	5,62	24,04	44,92
3	К+Г+П	160	3,5	3881	155	6,02	35,71	57,2
4	К+Г+С+П	260	4,0	3615	190	6,35	31,44	53,47

Додавання комплексу добавок (в поєднанні суперпластифікатора та пропіленгліколю) дає можливість значно знизити показник водовідділення з 8,0 мл до 4,0 мл при цьому суттєво не втративши показник розтікання, який склав 260 мм, що вказує на підвищену пластичність даного цементного тіста, що видно з табл. 5.

Згідно нормативних вимог [5] міцність на згин у віці 1 доба повинна бути не менше 3,5 МПа. Як видно з табл. 5 цементи отримані у всіх циклах дослідів значно перевищують цей показник. Сумісне поєднання двох добавок забезпечує найбільшу міцність на згин – до 6,35 МПа. Також, при аналізі даних на стиск у віці 2 доби, видно, що додавання тільки суперпластифікатора під час помелу цементу знижує міцність на 8 МПа в порівнянні з цементом без будь-яких добавок.

Аналіз результатів показників міцності на стиск у віці 28 діб показує, що поєднання суперпластифікатора з пропіленгліколем збільшує міцність на 6,7 МПа (12,5%). Проте також видно, що додавання окремо суперпластифікатора, порівнюючи з дослідом без будь-яких добавок, не значно знижує міцність (1,8 МПа). Порівнюючи цикли дослідів №3 та №4 видно, що присутність суперпластифікатора знижує міцність на стиск у віці 28 діб на 3,73 МПа (6,5%). Очевидно, що цей негативний ефект можна знівелювати зменшенням водоцементного відношення. Згідно

літературних даних [9, 10] та на практиці при замішуванні тампонажних розчинів використовується $V/C=0,44-0,5$.

Результати четвертого циклу дослідів показали, що показник розтікання є достатнім, і можна рухатись у напрямку зменшення водоцементного відношення при замішуванні тампонажного тіста. У табл. 6 представлені результати п'ятого циклу експерименту (з додаванням суперпластифікатора та пропіленгліколю) але при замішуванні тампонажного тіста з $V/C=0,4$.

З табл. 6 видно порівняння результатів двох дослідів з водоцементними відношеннями 0,5 та 0,4 відповідно. Як видно при $V/C=0,4$ показник розтікання падає до 230 мм але при цьому дане цементне тісто досі вважається пластичним, показник водовідділення при цьому склав 2,0 мл. Аналізуючи міцність на згин у віці 1 доба при різних V/C видно, що міцність майже не змінюється при зменшенні витрати води для замішування на 20 %.

Таблиця 6. Результати досліджень циклів експериментів

Номер циклу	Умовне позначення складу компонентів	V/C для приготування тампонажного тіста	Розтікання, мм	Водовідділення, мл	Питома поверхня цементу, $см^2/г$	Час загуснення до консистенції 30 Вс, хв	Міцність на згин у віці 1 доба, МПа	V/C для міцностей на стиск згідно ДСТУ	Міцність на стиск у віці 2 доби, МПа	Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа
4	К+Г+С+П	0,5	260	4,0	3615	190	6,35	0,39	31,4	53,5
5	К+Г+С+П	0,4	230	2,0	3668	165	6,38	0,35	39,7	59,9

Міцність на стиск у віці 2 доби в четвертому циклі дослідів визначалась для зразків згідно ДСТУ [8] при $V/C=0,39$. В п'ятому циклі дослідів при $V/C=0,35$. Як видно з табл. 6 міцність на стиск у віці 2 доби при зменшенні V/C на 10% збільшується на 8,26 МПа або на 20%, що свідчить про різке набуття міцності в зв'язку із зменшенням кількості води для замішування.

Міцність на стиск у віці 28 діб в четвертому циклі дослідів виконувалась згідно ДСТУ [8] при $V/C=0,39$. В п'ятому циклі дослідів при $V/C=0,35$. Як видно з табл. 6 міцність на стиск у віці 28 діб при зменшенні

В/Ц на 10% збільшується на 6,4 МПа або на 10,7%, що є очікуваним результатом.

Як видно з табл. 5 час загуснення цементного тіста до консистенції 30 Вс варіюється від 145 до 190 хв, що є допустимим, так як згідно вимог [5] воно має складати не менше 90 хв.

Висновки

Була розглянута ефективність комплексної добавки, що містить суперпластифікатор полікарбонатного типу та інтенсифікатор помелу – пропіленгліколь. Експериментально було встановлено, що поєднання суперпластифікатора у кількості 0,05% від маси цементу з пропіленгліколем в кількості 0,1% дозволяє забезпечити високе значення розтікання цементних розчинів (до 260 мм), питомої поверхні цементу при скороченій тривалості помелу, що дає можливість забезпечувати підвищену рухомість цементних розчинів, низьке водовідділення а також достатньо значну тривалість загуснення та необхідні міцнісні показники. Комплексна добавка забезпечує можливість зменшити кількість води для замішування на 20% при збереженні високої пластичності тампонажного тіста, низьке водовідділення (до 2,0 мл), час загуснення 165 хв, міцність на згин у віці 1 доба 6,35 МПа. Введення комплексної добавки дозволяє, за рахунок зменшення водопотреби розчинової суміші, збільшити міцність на стиск у віці 2 доби на 21% та у віці 28 діб на 11%.

При сумісному введенні під час помелу тампонажного цементу суперпластифікатора та пропіленгліколю проявляється їхній синергетичний ефект за рахунок збільшення поверхневої активності комплексної добавки. Зокрема високий синергетичний ефект проявляється по суттєвому збільшенні часу загуснення до консистенції 30 Вс, а також зменшенню водовідділення до 2,0 мл при достатньо високій пластичності.

Можна вважати, що введення комплексної добавки яка включає суперпластифікатор та пропіленгліколь є достатньо ефективним технологічним рішенням для забезпечення необхідних властивостей тампонажного цементу та розчинів на його основі.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Korogodska A., Shabanova G., Gaponova O., Deviatova N. (2023) Chemical industry waste-based oil-well cement. *AIP Conf. Proc.* 2490, 050025 <https://doi.org/10.1063/5.0123579>
2. Orlovs'kyi V. M. (2018) Polehsheni tamponazhni sumishi. *Mineral'ni resursy Ukrainy* №3; s 42-45, <https://doi.org/10.31996/mru.2018.3.42-45>
3. Khalaf H. A., Kovacsne G. F., Mohammed N. A., Remezczi F. (2022) Improving mechanical properties of oil well cement using polypropylene fibers and evaluating a new laboratory method for measuring the casing cement bonding strength. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin and the authors*, pp. 23-38, <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.5.3>
4. Abbas G., Irawan S., Memon K. R., Khan J. (2020) Application of cellulose based polymers in oil well cementing, *Germany Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 10:319–325, <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00800>
5. DERZHAVNYY STANDART UKRAYINY. Budivel'ni materialy. PORTLADTSEMENTY TAMPONAZHNI. Tekhnichni umovy. DSTU B V.2.7-86-99. Derzhavnyy komitet budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovoyi polityky Ukrainy. - Kyiv, 1999.
6. Krotiuk O. I., Dvorkin L. J. (2026) Properties of Oil-Well Cement with Adding Superplasticizer and Cellulose Ethers. *Advances in Science, Technology, and Society*, p 161-163, <https://doi.org/10.64076/iedc260111.15>
7. DERZHAVNYY STANDART UKRAYINY. Budivel'ni materialy. PORTLADTSEMENTY TAMPONAZHNI. METODY VYPROBUVAN'. DSTU B V.2.7-86-99. Derzhavnyy komitet budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovoyi polityky Ukrainy. - Kyiv, 1999.
8. NATSIONAL'NYY STANDART UKRAYINY. Budivel'ni materialy. TSEMENTY. METODY VYZNACHENNYA MITSNOSTI NA Z-HYN I NA STYSK. DSTU B V.2.7-187:2009. Ministerstvo rehional'noho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy. – Kyiv, 2010.
9. Nelson E. B., Guillot D. (2006) Well cementing, 2-nd edition, *Texas; Schlumberger*
10. API SPEC 10A:2019+ADD1:2019 Specification for Cements and Materials for Well Cementing.

Література

1. Korogodska A., Shabanova G., Gaponova O., Deviatova N. (2023) Chemical industry waste-based oil-well cement. *AIP Conf. Proc.* 2490, 050025 <https://doi.org/10.1063/5.0123579>

2. Орловський В. М. (2018) Полегшені тампонажні суміші. *Мінеральні ресурси України №3; с 42-45*, <https://doi.org/10.31996/mru.2018.3.42-45>
3. Khalaf H. A., Kovacsne G. F., Mohammed N. A., Remeczki F. (2022) Improving mechanical properties of oil well cement using polypropylene fibers and evaluating a new laboratory method for measuring the casing cement bonding strength. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin and the authors*, pp. 23-38, <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.5.3>
4. Abbas G., Irawan S., Memon K. R., Khan J. (2020) Application of cellulose based polymers in oil well cementing, *Germany Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 10:319–325, <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00800>
5. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ. Будівельні матеріали. ПОРТЛАДЦЕМЕНТИ ТАМПОНАЖНІ. Технічні умови. ДСТУ Б В.2.7-88-99. Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України. - Київ, 1999.
6. Krotiuk O. I., Dvorkin L. J. (2026) Properties of Oil-Well Cement with Adding Superplasticizer and Cellulose Ethers. *Advances in Science, Technology, and Society*, p 161-163, <https://doi.org/10.64076/iedc260111.15>
7. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ. Будівельні матеріали. ПОРТЛАДЦЕМЕНТИ ТАМПОНАЖНІ. МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ. ДСТУ Б В.2.7-86-99. Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України. - Київ, 1999.
8. НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ. Будівельні матеріали. ЦЕМЕНТИ. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ НА ЗГИН І НА СТИСК. ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – Київ, 2010.
9. Nelson E. B., Guillot D. (2006) Well cementing, 2-nd edition., *Texas; Schlumberger*
10. API SPEC 10A:2019+ADD1:2019 Specification for Cements and Materials for Well Cementing.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 02.04.2026	Received 02.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 09.05.2026	Received in revised form 09.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. I. Krotiuk*

PhD student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2712-8644>

Department construction products technology and materials science

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Soborna St., 11, Rivne, Ukraine, 33028

L. J. Dvorkin

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8759-6318>

Department construction products technology and materials science

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Soborna St., 11, Rivne, Ukraine, 33028

Effectiveness of a complex additive based on a superplasticizer and a grinding intensifier for oil-well cement

How to Cite:

Krotyuk O. I., Dvorkin L. J. (2026). Effectiveness of a complex additive based on a superplasticizer and a grinding intensifier for oil-well cement. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 76-87. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-06](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-06)

Abstract. The article presents the results of a study of the effectiveness of a complex additive containing a polycarboxylate superplasticizer and a grinding intensifier during the production of oil-well cement in a cement ball mill. Established quantitative grinding regime parameters and the main properties of oil-well cement. Determined general directions for improving the oil-well cement grinding process. Presented the general trend of intensification of the cement grinding process when using various combinations of additive components, based on the specific surface area of cement. Determined ways to reduce the water separation of oil-well cement with the complex action of the additive composition. Presented possible ways to reduce the water-cement ratio with sufficient spreading of the oil-well cement and ensuring its plasticity properties. It is determined that the combination of a superplasticizer in an amount of 0.05% and propylene glycol 0.1% by weight of cement makes it possible to achieve a low water separation index when cement paste spreading up to 260 mm. Obtained results make it possible to reduce the amount of mix water by 20%. Presented the dynamics of changes in the strength indicators of oil-well cement with different combinations of the studied additives. The introduction of the proposed additives during grinding ensures sufficient homogeneity of mixing with cement. Based on the results of the study, it can be concluded that the introduction of the proposed complex additive can serve simultaneously as a grinding intensifier and a modifier of the main properties of oil-well cement.

Keywords: oil-well cement, specific surface area, superplasticizer, propylene glycol, free water separation, spreading.

УДК 69:658.5

В. І. Анін

д.е.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2936-2262>

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Запорізький національний університет, просп. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006

Д. О. Фостащенко*

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4572-8623>

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Запорізький національний університет, просп. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006

*автор-кореспондент, e-mail: fostaschenko1@gmail.com

Удосконалення організаційно-технологічних процесів у сфері інфраструктурного будівництва із застосуванням системного підходу

Цитувати як:

Анін, В. І., Фостащенко, Д. О. (2026). Удосконалення організаційно-технологічних процесів у сфері інфраструктурного будівництва із застосуванням системного підходу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 88-101. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-07](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-07)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті досліджено проблему удосконалення організаційно-технічних процесів у сфері інфраструктурного будівництва із застосуванням системного підходу. Дослідження спрямоване на підвищення ефективності інфраструктурного будівництва шляхом застосування системного підходу, який інтегрує технологічні, організаційні, логістичні та ресурсні підсистеми.

Сучасне інфраструктурне будівництво характеризується використанням різномірних технологій, залученням численних підрядників, складною логістикою матеріалів і значною залежністю від зовнішніх факторів. Фрагментовані методи управління, орієнтовані на окремі операції, часто призводять до затримок у часі, втрат ресурсів до 15% і перевищення кошторисної вартості. Системний підхід розглядає будівництво як динамічну багаторівневу систему, що дає змогу виявляти «вузькі місця», координувати підсистеми та адаптивно реагувати на збурення. Дослідження поєднує аналіз наукової літератури та практичних кейсів, системне моделювання робочих процесів і цифрову інтеграцію із застосуванням BIM та інформаційно-аналітичних платформ. Було змодельовано оптимізацію розподілу ресурсів і графіків постачання матеріалів для оцінки скорочення тривалості будівельного циклу та зменшення втрат. Порівняльний аналіз традиційних і системно-інтегрованих підходів демонструє переваги координації, прозорості та прогнозного управління.

Доведено, що системна інтеграція дозволяє скоротити тривалість будівництва приблизно на 12–15%, зменшити втрати матеріалів на 10% та

підвищити прогнозованість завершення проєктів. Узгоджене планування технологічних, логістичних і управлінських підсистем мінімізує каскадні затримки. Цифрові моделі забезпечують раннє виявлення проєктних конфліктів і оптимізацію використання ресурсів. Адаптивне системне управління підвищує стійкість до перебоїв у постачанні, обмежень на будівельному майданчику та непередбачуваних технічних викликів.

Наукова новизна та практична цінність. Запропонований підхід формує методологічну основу для ефективного та стійкого інфраструктурного будівництва. Інтеграція BIM, цифрових платформ і оптимізаційних моделей забезпечує прозорість, надійне планування та оперативне прийняття рішень та сприяє сталому виконанню проєктів в умовах складної соціально-економічної ситуації.

Ключові слова: інфраструктурне будівництво; організаційно-технологічні процеси; системний підхід; оптимізація ресурсів; адаптивне планування

Вступ

Інфраструктурне будівництво в сучасних соціально-економічних умовах є одним із найскладніших і найбільш ресурсомістких секторів будівельної галузі, оскільки поєднує значну кількість різномірних технологічних процесів, багаторівневу організацію виробництва та високу залежність від зовнішніх факторів. Реалізація інфраструктурних проєктів здійснюється за підвищених вимог до надійності, безпеки та довговічності об'єктів, а також в умовах жорстких часових, фінансових і ресурсних обмежень. У цьому контексті ефективність організаційно-технологічних процесів стає визначальним чинником загального успіху будівельного виробництва.

Накопичений практичний досвід свідчить, що застосування традиційних, фрагментованих підходів до організації будівництва, які зосереджені на оптимізації окремих технологічних операцій або локальних процесів, не забезпечує належного рівня керованості та стійкості складних інфраструктурних систем. Відсутність узгодженості між проєктними рішеннями, будівельними технологіями, управлінням ресурсами та управлінськими механізмами призводить до збільшення втрат часу і ресурсів, зниження продуктивності праці, а також підвищення ризиків затримок у реалізації проєктів і перевищення їх кошторисної вартості.

За таких умов виникає об'єктивна необхідність переходу до системного підходу в удосконаленні організаційно-технологічних процесів інфраструктурного будівництва. Системний підхід дозволяє розглядати будівельне виробництво не як сукупність ізольованих процесів, а як складну багаторівневу динамічну систему, у якій технологічні, організаційні, ресурсні та управлінські підсистеми тісно взаємодіють між собою. Такий підхід забезпечує комплексний аналіз внутрішніх і

зовнішніх зв'язків, виявлення критичних точок неефективності та розроблення інтегрованих рішень, спрямованих на досягнення загальної результативності проєкту.

Системний підхід є особливо актуальним у сфері інфраструктурного будівництва, яка характеризується високою варіативністю умов виконання робіт, значною кількістю учасників будівельного процесу, складною логістикою матеріально-технічних ресурсів і тривалим життєвим циклом об'єктів. У цьому контексті вдосконалення організаційно-технологічних процесів передбачає не лише оптимізацію будівельних технологій, а й формування ефективних механізмів координації, планування, моніторингу та адаптації будівельного виробництва до змінних умов реалізації проєктів.

Отже, дослідження удосконалення організаційно-технологічних процесів в інфраструктурному будівництві на основі системного підходу є науково та практично обґрунтованим і спрямоване на розроблення сучасних моделей управління будівництвом, здатних підвищити ефективність, керованість і стійкість інфраструктурних проєктів у довгостроковій перспективі.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Питання удосконалення організаційно-технологічних процесів у сфері інфраструктурного будівництва із застосуванням системного підходу відображено в працях провідних українських вчених, зокрема: Арутюнян І.А., Кравчуновської Т.С., Поколенка В.О., Радкевича А.В., Тугая О.А.

Проблематика вдосконалення організаційно-технологічних процесів у будівництві із застосуванням системного підходу широко висвітлюється у наукових працях Арутюнян І.А. Дослідження автора спрямовані на підвищення ефективності будівельного виробництва шляхом інтеграції системної інженерії, логістики [1, 2] та цифрових методів управління [3].

Наукові праці Арутюнян І.А. формують сучасне бачення вдосконалення організаційно-технологічних процесів у будівництві. Автор доводить, що застосування системного підходу, зокрема через інструменти логістики та моделювання, є ключовим напрямом підвищення ефективності інфраструктурного будівництва в умовах цифрової трансформації галузі.

У праці [4] значна увага приділяється впровадженню системного підходу до управління будівельними проєктами. Автори пропонують використовувати інструменти оцінювання функціонально-технічної надійності підрядників, що дозволяє підвищити ефективність прийняття управлінських рішень.

У спільних наукових дослідженнях [5] запропоновано модель «проєкт – будівництво – результат», яка відображає системний підхід до

організації будівництва, де всі етапи розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної системи. Це забезпечує підвищення керованості та ефективності інфраструктурних проєктів.

На початковому етапі дослідження було проведено комплексний аналіз наукових публікацій і методичних розробок, присвячених організації будівельного виробництва та управлінню інфраструктурними проєктами. Сучасні дослідження підкреслюють зростаючу роль цифрових технологій та інтегрованих систем управління у будівництві. Зокрема, у роботі [6] обґрунтовано ефективність застосування BIM-технологій, цифрових платформ та інформаційно-аналітичних систем як інструментів інтеграції проєктних, технологічних і організаційних рішень у будівельних проєктах. Такі підходи дозволяють підвищити прозорість управлінських процесів і покращити координацію між учасниками проєкту.

Вагомий внесок у розвиток оптимізаційних підходів до організації будівництва зроблено Арутюняном Є.Є., який запропонував оптимізаційну модель організації будівельних процесів у межах функціонально-планувальної структури міської інфраструктури. Автор наголошує, що застосування системного аналізу до технологічних, організаційних і просторових факторів дозволяє підвищити ефективність реалізації інфраструктурних проєктів [7].

Також розвиток цього напрямку досліджень відображено у працях [7, 8], де проаналізовано сучасні тенденції організації будівництва в умовах щільної міської забудови. У дослідженнях підкреслюється важливість адаптивних організаційно-технологічних рішень, що забезпечують гнучкість будівельних процесів і ефективне використання ресурсів.

Крім того, методологічна база дослідження враховує сучасні наукові напрацювання, присвячені трансформації капітального будівництва в умовах підвищеної невизначеності та обмеженості ресурсів. Зокрема, у роботі [9] проаналізовано особливості організації будівництва в умовах воєнного стану, з акцентом на ролі системних підходів до управління для забезпечення стабільності будівельних процесів.

З огляду на ускладнення інфраструктурних об'єктів, обмеженість ресурсної бази та підвищені вимоги до якості і строків виконання робіт, виникає необхідність впровадження системного підходу як методологічної основи вдосконалення процесів планування, проєктування, реалізації та контролю у будівельній галузі. Такий підхід дозволяє сформулювати нові принципи організації праці, логістики, ресурсного забезпечення та управління ризиками, що сприятиме підвищенню ефективності реалізації інфраструктурних проєктів у сучасних умовах.

Досягнення поставленої мети передбачає:

- системний аналіз для дослідження взаємодії між організаційними, технологічними та ресурсними підсистемами інфраструктурного будівництва;
- порівняльний аналіз традиційних і системно-інтегрованих підходів до організації будівництва;
- моделювання організаційно-технологічних процесів з урахуванням ресурсних обмежень і логістичних факторів;
- аналіз ефективності цифрових технологій, зокрема BIM-рішень, у вдосконаленні управління будівництвом.

Застосування зазначених методів дозволило виявити основні фактори, що впливають на ефективність процесів інфраструктурного будівництва, та обґрунтувати доцільність впровадження інтегрованих моделей управління на основі системного підходу.

Мета і завдання дослідження. Метою цього дослідження є удосконалення організаційно-технологічних процесів в інфраструктурному будівництві, зокрема під час реалізації проєктів транспортної інфраструктури, таких як мости, автомобільні дороги та інженерні споруди, шляхом застосування системного підходу. Дослідження зосереджене на аналізі взаємодії технологічних, організаційних, логістичних і ресурсних підсистем у межах будівельних проєктів, а також на розробленні інтегрованих управлінських рішень, що підвищують ефективність, надійність і стійкість будівельних процесів в умовах складної реалізації.

Матеріали та методи

Методологічну основу цього дослідження становить сукупність теоретичних і прикладних методів, спрямованих на аналіз та удосконалення організаційно-технологічних процесів в інфраструктурному будівництві. Дослідження базується на принципах системного підходу, що дозволяє розглядати будівельне виробництво як складну багаторівневу систему, яка складається з взаємопов'язаних технологічних, організаційних, логістичних і управлінських підсистем.

Результати та обговорення

Інфраструктурне будівництво в сучасних умовах характеризується високим рівнем складності організаційно-технологічних процесів. Ця складність зумовлена одночасним поєднанням численних різномірних технологій, залученням великої кількості учасників будівельного процесу та значною залежністю від зовнішніх факторів. Аналіз практичної реалізації інфраструктурних проєктів у містах України показав, що традиційні підходи до організації будівництва, які зосереджені переважно

на оптимізації окремих технологічних операцій, не забезпечують необхідного рівня керованості та не враховують динамічної взаємодії між виробничими підсистемами [10].

У результаті зростають втрати часу і ресурсів, перевищуються кошторисні обмеження проєктів, знижується продуктивність праці. За статистикою великих проєктів будівництва доріг і мостів, втрати ресурсів досягали 12–18%, а тривалість будівництва перевищувала заплановані строки на 10–15% [6].

У таблиці 1 наведено основні техніко-економічні показники, що використовуються для порівняння проєкту організації будівництва та проєкту виконання робіт. До основних показників належать загальна тривалість будівництва та вартість основних виробничих фондів, необхідних для організації будівельного процесу, а також тривалість і вартість будівництва окремих об'єктів у межах проєкту виконання робіт.

Таблиця 1. Техніко-економічні показники

Проєкт організації будівництва	Проєкт виконання робіт
Основні	
Тривалість будівництва Вартість основних виробничих фондів будівельної організації	Тривалість будівництва об'єктів Собівартість будівництва
Допоміжні	
Запроєктований рівень охоплення потоком робіт Механооснащеність будівництва Показник витрат на тимчасові будівлі та споруди Рівномірність введення в дію житлової (корисної) площі	Рівень механізації основних будівельно-монтажних робіт Питомий рівень затрат ручної праці Рівень використання ведучих (основних) будівельних машин Трудомісткість будівництва

Додаткові показники відображають більш детальні аспекти ефективності будівництва та організації процесів, зокрема ступінь охоплення потоків робіт, рівень механізації будівельно-монтажних робіт, питомі витрати ручної праці, забезпеченість механізацією, коефіцієнт використання провідних будівельних машин, трудомісткість будівельних робіт, а також витрати на тимчасові будівлі та споруди.

Така комплексна система показників дозволяє здійснювати системну оцінку ефективності організаційно-технологічних процесів і виявляти ключові фактори, що впливають на продуктивність і економічні результати будівельного виробництва.

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що вирішення зазначених проблем можливе лише шляхом впровадження системного

підходу, який розглядає будівельне виробництво як динамічну багаторівневу систему, де технологічні, організаційні, ресурсні та управлінські підсистеми постійно взаємодіють між собою [7]. На відміну від фрагментованих методів управління, системний підхід забезпечує комплексний аналіз будівельних процесів, виявлення критичних точок неефективності, прогнозування потенційних ризиків і розроблення інтегрованих рішень, спрямованих на підвищення ефективності та стійкості інфраструктурних об'єктів.

Результати проведеного дослідження демонструють, що впровадження цифрових платформ, інтегрованих інформаційно-аналітичних систем і BIM-технологій суттєво підвищує керованість будівельного виробництва. Зокрема, застосування технології інформаційного моделювання будівель (BIM) дозволяє створювати інтегровані тривимірні моделі інфраструктурних об'єктів, що містять повний набір технічних, економічних і експлуатаційних параметрів. Це забезпечує можливість точного планування та контролю на всіх етапах будівництва, координації роботи між архітекторами, інженерами та підрядниками, а також оперативного виявлення і усунення потенційних проєктних конфліктів.

Використання BIM-технологій також сприяє підвищенню ефективності постачання ресурсів, зменшенню втрат матеріалів, мінімізації простоїв, спричинених затримками постачання, та підвищенню прозорості управлінських рішень протягом усього життєвого циклу інфраструктурних об'єктів.

Методичне забезпечення організації будівництва промислових та інфраструктурних об'єктів потребує не лише адаптації класичних принципів календарного планування і контролю якості, але й розроблення оптимізаційних моделей, що враховують просторові, функціональні та логістичні особливості міських територій. Результати моделювання показують, що запропонована оптимізаційна модель, яка інтегрує послідовність технологічних операцій із графіками постачання матеріалів та розподілом ресурсів, дозволяє скоротити середню тривалість будівельного циклу приблизно на 14%. Ці результати узгоджуються з висновками Є.Е. Арутюняна, який підкреслював ефективність оптимізаційних моделей у підвищенні результативності будівництва міської інфраструктури [7].

Зв'язок між точністю постачання матеріалів і тривалістю реалізації проєкту ілюструється на рис. 1, тоді як на рис. 2 наведено модель скорочення будівельного циклу, отриману в процесі моделювання. Результати демонструють, що навіть незначні порушення логістики постачання будівельних матеріалів і техніки можуть спричинити каскадні затримки у виконанні наступних технологічних операцій.

Актуальність системного підходу особливо проявляється в умовах щільної міської забудови та складної логістики, де велика кількість

учасників проєкту і обмежений простір для транспортування матеріалів потребують високого рівня координації між усіма елементами будівельного процесу. Навіть незначні відхилення у графіках постачання можуть призводити до суттєвих порушень у виконанні робіт.

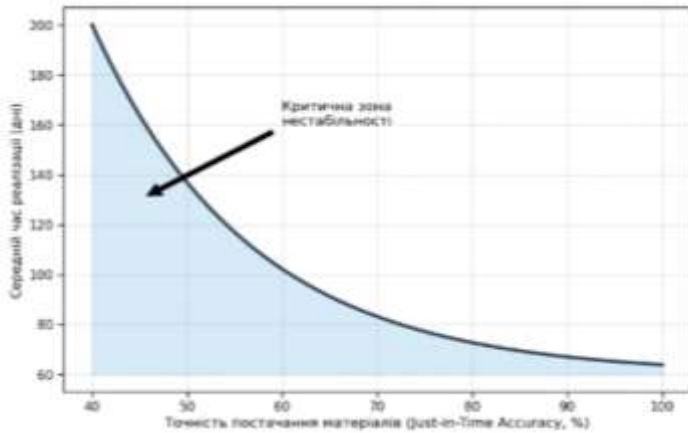
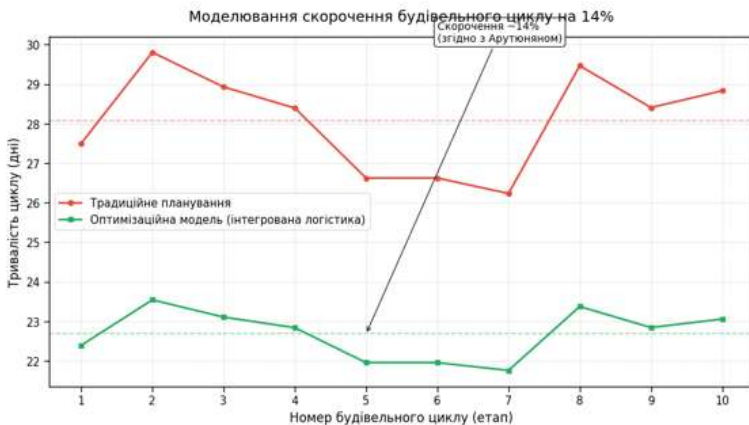


Рис. 1. Вплив точності постачання матеріалів на середній час реалізації проєкту



ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛЕЙ:

Параметр	Традиційна модель	Оптимізована модель
Середній час циклу	28.1 дн.	22.7 дн.
Максимальна затримка	29.8 дн.	23.5 дн.
Прогнозованість (вар.)	Низька	Висока

Рис. 2. Модель скорочення будівельного циклу

Ефективність системної інтеграції також підтверджується аналізом взаємодії організаційних і технологічних підсистем. Отримані результати свідчать, що інтегрована координація цих підсистем дозволяє оптимізувати використання ресурсів, зменшити втрати та забезпечити вищий рівень прогнозованості будівельних процесів, що є особливо важливим в умовах обмеженого фінансування та жорстких термінів виконання робіт [8].

В умовах воєнного стану та підвищеної невизначеності проведене дослідження демонструє, що системний підхід не лише підвищує ефективність, а й забезпечує більшу стійкість будівельних процесів.

Сценарне моделювання нестачі ресурсів і варіативності умов будівництва свідчить, що проекти, які базуються на системно-інтегрованих моделях управління, здатні адаптуватися до змін середовища у 1,5–2 рази оперативніше порівняно з проєктами, що реалізуються із застосуванням традиційних підходів до організації будівельного виробництва [9].

Проведене дослідження демонструє, що застосування системного підходу до вдосконалення організаційно-технологічних процесів в інфраструктурному будівництві є ефективним інструментом підвищення керованості процесів, оптимізації використання ресурсів і посилення стійкості будівельних проєктів. Використання інтегрованих моделей управління, цифрових платформ та оптимізаційних методів дозволяє не лише скоротити тривалість будівельних робіт і підвищити продуктивність, а й забезпечити прогнозованість реалізації проєктів навіть в умовах підвищеної невизначеності та обмежених ресурсів.

Дослідження показує, що ефективність інфраструктурного будівництва значною мірою залежить від системної організації та інтеграції технологічних, управлінських і ресурсних процесів. Встановлено, що фрагментовані підходи до планування і виконання будівельних робіт, які зосереджені лише на оптимізації окремих операцій, не забезпечують належного рівня контролю над виробничими процесами та часто призводять до збільшення строків реалізації проєктів, перевищення кошторисної вартості та зростання експлуатаційних ризиків.

Дослідження підтверджує, що системний підхід дозволяє розглядати будівельне виробництво як єдину динамічну систему, у якій кожен елемент – технологічний, організаційний і управлінський – функціонує у взаємодії з іншими. Такий підхід забезпечує виявлення критичних «вузьких місць» у будівельному процесі, прогнозування наслідків управлінських рішень і розроблення інтегрованих планів, спрямованих на досягнення оптимальної продуктивності та якості будівництва.

Зокрема, аналіз виробничих потоків, ресурсного забезпечення та логістики показав, що структуризація взаємозв'язків між підсистемами дозволяє скоротити тривалість будівельних циклів і підвищити ефективність використання трудових і матеріальних ресурсів. Визначено критичні точки, де втрати часу і матеріалів є найбільш значними, та запропоновано заходи щодо їх мінімізації шляхом централізованого планування і координації.

Дослідження також виявило, що інтеграція планування робіт, контролю якості та управління ресурсами дозволяє сформувати адаптивну модель будівельного виробництва, здатну гнучко реагувати на зміни зовнішніх умов, включаючи перебої у постачанні матеріалів, погодні фактори та непередбачені технологічні збої. Впровадження таких моделей суттєво підвищує керованість будівельних процесів і знижує ризики затримок у реалізації інфраструктурних проєктів.

На основі проведеного аналізу сформульовано такі ключові висновки: системний підхід є необхідною умовою ефективного управління організаційно-технологічними процесами будівництва; комплексна інтеграція підсистем дозволяє мінімізувати втрати ресурсів і підвищити продуктивність праці; адаптивне управління забезпечує стійкість будівельного виробництва в умовах внутрішніх і зовнішніх змін; впровадження інтегрованих моделей управління створює передумови для підвищення якості, надійності та довговічності інфраструктурних об'єктів.

Висновки

Сучасне будівництво інфраструктури є системним викликом: традиційні, роз'єднані підходи, що оптимізують лише окремі операції, не враховують складність, взаємозалежність та невизначеність сучасних проєктів. Великі інфраструктурні об'єкти включають різноманітні технології, багаторівневу логістику та численних учасників, що призводить до ланцюгових неефективностей, неправильного розподілу ресурсів і непередбачуваних затримок.

Дослідження показує, що лише системний підхід дозволяє узгоджено управляти цими процесами, розглядаючи будівництво як інтегровану, адаптивну мережу технологічних, організаційних, управлінських і ресурсних підсистем. Використання BIM-технологій, цифрових платформ та моделей оптимізації забезпечує передбачувану координацію, точний розподіл ресурсів і оперативне вирішення прихованих конфліктів. Моделювання взаємозв'язків між ланцюгами постачання, послідовністю робіт та розподілом праці допомагає виявляти вузькі місця та системно їх усувати.

Крім того, адаптивне системне управління підвищує стійкість до невизначеності, включно з порушеннями постачання, просторовими обмеженнями та непередбачуваними операційними проблемами.

Зрештою, впровадження системного підходу не лише підвищує ефективність, передбачуваність і продуктивність, але й зміцнює структуру, функціональність та стратегічну надійність інфраструктурних проєктів і створює надійну основу для сталого та високоєфективного будівництва в складних соціально-економічних умовах.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

(Або вказати офіційні вихідні дані теми державної науково-дослідної роботи, гранту тощо)

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Arutiunian, I. A., & Arutiunian, Ye. E. (2021). Optymizatsiia budivelnoho vyrobnytstva za rakhunok systematekhnichnykh ta lohistrychnykh pidkhodiv. Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, 19, 12-18. URL: <http://btrp.diit.edu.ua/article/view/233869>
2. Arutiunian, I. A., & Kovalenko, O. S. (2024). Optymizatsiia orhanizatsiinykh protsesiv u tsyvilnomu budivnytstvi za dopomohoiu lohistrychnykh modelei. Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, 25, 13-19. DOI: <http://btrp.diit.edu.ua/article/view/303286>
3. Arutiunian, I. A., Azhazha O. V., Kuznetsov V. V. & Arutiunian Ye. E. (2024). Rozvytok innovatsiinykh tekhnolohii v budivnytstvi ta tsyvilnii inzhenerii v umovakh tsyfrovizatsii ekonomiky Ukrainy. Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, (25), 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2024/303240>
4. Pokolenko, V. O., Ryzhakova, H. M., & Prykhodko, D. O. (2016). Zaprovadzhennia instrumentarii vyboru alternatyv realizatsii budivelnykh proektiv za funktsionalno-tekhnichnoi nadiinistiu orhanizatsii-vykonavtsiv. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system, (19). DOI: <https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-19/108-114.pdf>; (accessed: 06.03.2026) (accessed: 04.12.2023)

5. Orhanizatsiino-tekhnologichna model «Proekt-budova-rezultat» - suchasnyi instrument orhanizatsiini bahatostadiinoi vzaiemodii developera iz zamovnykom budivelnogo proektu (2010). O. A. Tuhai, H. V. Lahutin, V. O. Pokolenko [ta in.] // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia : nauk.–tekhn. zb. / Kyiv. nats. un-t bud-va i arkh. ; vidp. red. M. M. Osietrin. Kyiv : KNUBA, 2010. Vyp. 36. S. 448 – 452. DOI: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/8883>

6. Mykhailyk D.V., Sokolov I.A. (2025). Suchasni tsyfrovi pidkhydy do orhanizatsiino-tekhnologichnoho zabezpechennia zvedennia budivel ta sporud. Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury, № 5 (029), 82-89. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.051125.82.1194>

7. Arutiunian, Ye. E. (2022). Optymizatsiina model orhanizatsiini budivnytstva v umovakh funktsionalno-planuvanoi infrastruktury mist. Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, 21, 5-12. DOI: <http://btrp.diiit.edu.ua/article/view/258202>

8. Arutiunian, I., Banakh, A. ta Arutiunian, Ye. (2020). Suchasni tendentsii orhanizatsiini budivelnogo vyrobnytstva v umovakh shchilnoi miskoi zabudovy. Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn, 43, 51–58. DOI: <https://ways.knuba.edu.ua/article/download/198203/198471/442282>

9. Kosmii M., Habrel M., Kasianchuk V., & Shevchuk M. (2024). Transformatsii ta osoblyvosti kapitalnoho budivnytstva v umovakh voiennoho stanu. Pryklad «tylovoi» oblasti. Prostorovyi rozvytok, (9), 190–207. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.9.190-207>

10. Kramsky, S., & Darushyn, O. (2025). MANAGEMENT OF INFRASTRUCTURE PROJECTS AND PROGRAMS OF PROJECT-ORIENTED ORGANIZATIONS IN TURBULENT CONDITIONS. Grail of Science, (53), 337–343. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.06.2025.037>

Література

1. Арутюнян, І. А., & Арутюнян, Є. Е. (2021). Оптимізація будівельного виробництва за рахунок систематехнічних та логістичних підходів. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 19, 12-18. DOI: <http://btrp.diiit.edu.ua/article/view/233869>

2. Арутюнян, І. А., & Коваленко, О. С. (2024). Оптимізація організаційних процесів у цивільному будівництві за допомогою логістичних моделей. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 25, 13-19. DOI: <http://btrp.diiit.edu.ua/article/view/303286>

3. Арутюнян, І. А., Ажажа О. В., Кузнецов В. В. & Арутюнян Є. Е. (2024). Розвиток інноваційних технологій в будівництві та цивільній інженерії в умовах цифровізації економіки України. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, (25), 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15802/btrp2024/303240>

4. Pokolenko, V. O., Ryzakova, G. M., & Prihodko, D. O. (2016). Zaprovadzhennia instrumentariu voboru альтернатив realizatsii budivelnih proektiv za funktsionalno-tekhnichnoiu nadийnistiu organizatsiivikonavtsiv. Upravlinnia rozvytkom skladnih sistem, (19). DOI: <https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-19/108-114.pdf>

5. Організаційно-технологічна модель «Проект-будова-результат» - сучасний інструмент організації багатостадійної взаємодії девелопера із замовником будівельного проекту (2010). О. А. Тугай, Г. В. Лагутін, В. О. Поколенко [та ін.] // Містобудування та територіальне планування: наук.–техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт.; відп. ред. М. М. Осетрін. Київ : КНУБА, 2010. Вип. 36. С. 448 – 452. DOI: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/8883>

6. Михайлик Д.В., Соколов І.А. (2025). Сучасні цифрові підходи до організаційно-технологічного забезпечення зведення будівель та споруд. Український журнал будівництва та архітектури, № 5 (029), 82-89. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.051125.82.1194>

7. Арутюнян, С. Е. (2022). Оптимізаційна модель організації будівництва в умовах функціонально-планувальної інфраструктури міст. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 21, 5-12. DOI: <http://bttpp.diit.edu.ua/article/view/258202>

8. Арутюнян, І., Банах, А. та Арутюнян, С. (2020). Сучасні тенденції організації будівельного виробництва в умовах щільної міської забудови. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин, 43, 51–58. DOI: <https://ways.knuba.edu.ua/article/download/198203/198471/442282>

9. Космій М., Габрель М., Касяничук В., & Шевчук М. (2024). Трансформації та особливості капітального будівництва в умовах воєнного стану. Приклад «тилової» області. Просторовий розвиток, (9), 190–207. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.9.190-207>

10. Крамський, С., & Дарушин, О. (2025). УПРАВЛІННЯ ІНФРАСТРУКТУРНИМИ ПРОЄКТАМИ ТА ПРОГРАМАМИ ПРОЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ В ТУРБУЛЕНТНИХ УМОВАХ. Grail of Science, (53), 337–343. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.06.2025.037>.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 20.04.2026	Received 20.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 20.04.2026	Received in revised form 20.04.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.06.2026

V. I. Anin

D.Sc. in Economics, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2936-2262>

Department of Industrial and Civil Engineering

Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhia, 226 Sobornyi Avenue, Ukraine, 69006

D. O. Fostashchenko*

Ph.D.Student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4572-8623>

Department of Industrial and Civil Engineering

Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhia, 226 Sobornyi Avenue, Ukraine, 69006

*corresponding author, e-mail: fostaschenko1@gmail.com

Improvement of organizational and technological processes in the field of infrastructure construction using a systems approach

How to Cite:

Anin, V. I., Fostashchenko, D. O. (2026). Improvement of organizational and technological processes in the field of infrastructure construction using a systems approach. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 25, 88-101. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-07](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-07)

Abstract. The article investigates the problem of improving organizational and technical processes in the field of infrastructure construction using a systems approach. The research is aimed at increasing the efficiency of infrastructure construction by applying a systems approach that integrates technological, organizational, logistical and resource subsystems.

Modern infrastructure construction is characterized by the use of heterogeneous technologies, the involvement of numerous contractors, complex logistics of materials and significant dependence on external factors. Fragmented management methods focused on individual operations often lead to time delays, resource losses of up to 15% and cost overruns. The systems approach considers construction as a dynamic multi-level system, which allows you to identify "bottlenecks", coordinate subsystems and respond adaptively to disturbances. The study combines a literature review and case studies, system modeling of work processes, and digital integration using BIM and information and analytical platforms. Optimization of resource allocation and material supply schedules were simulated to estimate the reduction of construction cycle time and waste. A comparative analysis of traditional and system-integrated approaches demonstrates the advantages of coordination, transparency, and predictive management.

System integration has been proven to reduce construction time by approximately 12–15%, reduce material losses by 10%, and increase project completion predictability. Coordinated planning of technological, logistical, and management subsystems minimizes cascading delays. Digital models enable early detection of design conflicts and optimize resource utilization. Adaptive system management increases resilience to supply disruptions, site constraints, and unforeseen technical challenges.

Scientific novelty and practical value. The proposed approach forms a methodological basis for effective and sustainable infrastructure construction. The integration of BIM, digital platforms and optimization models ensures transparency, reliable planning and operational decision-making and contributes to the sustainable implementation of projects in a difficult socio-economic situation.

Keywords: infrastructure construction; organizational and technological processes; system approach; resource optimization; adaptive planning

УДК 624.012.25

О. П. Конончук*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3601-8352>

Кафедра будівельної механіки

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, вул. Руська, 56, Тернопіль, Україна, 46001

*автор-кореспондент, e-mail: kononchukop@gmail.com

Напружено-деформований стан залізобетонних надпідвальних перекриттів корівників після зміни режиму завантаження

Цитувати як:

Конончук, О. П. (2026). Напружено-деформований стан залізобетонних надпідвальних перекриттів корівників після зміни режиму завантаження. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 102-114. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-08](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-08)

© 2026, Автор. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті представлено результати детального інструментального обстеження несучих конструкцій збірних залізобетонних надпідвальних перекриттів будівель корівників №3, №4, №5 та №6, що знаходяться за адресою вул. Адамківська, буд. 1 в с. Зоря Рівненського району Рівненської області. В межах даних досліджень, виконано обмірні роботи несучих конструкцій надпідвальних перекриттів та підвалів будівель з оформленням відповідних креслень. Використовуючи неруйнівні методи контролю, визначено кубову міцність бетону колон, ригелів та плит перекриття. Також досліджено їх армування, ступінь втрати поперечного бетонного перерізу та армування в результаті впливу агресивного середовища. Базуючись на отриманих даних, запропоновано комплекс заходів по відновленню початкових властивостей конструкцій.

Проаналізовано напружено-деформований стан надпідвальних перекриттів будівель корівників при дії на них нових режимів завантаження від нового способу утримання корів, а також від використання нового сучасного обладнання. Запропоновано конструктивні рішення для відновлення та підсилення конструкції збірних залізобетонних перекриттів, що дасть можливість стриймати навантаження, які будуть діяти після реконструкції будівель. Використовуючи ПК Ліра-Сапр, методом скінченних елементів змодельовано роботу збірного залізобетонного каркасу надпідвального перекриття будівель з врахуванням нових видів навантаження. Розраховано монолітну залізобетону розподільчу плиту поверх існуючого перекриття для передачі нових навантажень на існуючі конструкції. Застосування такого рішення дозволило зберегти існуюче перекриття та використати його залишковий ресурс для подальшої безпечної та надійної експлуатації будівель корівників.

Ключові слова: інструментальне обстеження, корівники, перекриття, перевірочний розрахунок, метод скінченних елементів, підсилення.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. На даний час, в умовах війни та складної економічної ситуації в державі, все частіше виникає потреба відновлення сільськогосподарських об'єктів, які тривалий час не експлуатувались. Дана тенденція пов'язана з переміщенням великих тваринницьких комплексів зі сходу України. Разом з тим, існуючі сільськогосподарські будівлі ні за планувальними рішеннями, ні за несучою здатністю конструкцій досить часто не відповідають сучасним технологічним та естетичним вимогам. Виникає потреба їх реконструкції, що часто потребує зміни їх функціонального призначення.

Застосування нових технологій та нових підходів до утримання тварин потребує втручання в несучі конструкції таких будівель, що тягне за собою зміну конструктивної схеми. Такі підходи потребують вивчення впливу нових видів навантаження на вже існуючі будівельні об'єкти.

Дані інструментальні дослідження є продовженням технічного обстеження будівель корівників №3, №4, №5 та №6 на предмет можливість демонтажу надпідвальних перекриттів згідно [1].

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є встановлення дійсного напружено-деформованого стану збірних залізобетонних надпідвальних перекриттів корівників після зміни режиму їх завантаження.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання дослідження:

- виконати інструментальне обстеження збірних залізобетонних надпідвальних перекриттів корівників №3, №4, №5 та №6;
- встановити дійсний технічний стан несучих конструкцій збірних залізобетонних надпідвальних перекриттів корівників із визначенням величини втрати їх поперечного перерізу в результаті контакту із агресивним середовищем;
- дослідити неруйнівними методами контролю міцність бетону та параметри армування збірних залізобетонних конструкцій надпідвальних перекриттів корівників;
- виконати методом скінченних елементів моделювання роботи збірних залізобетонних надпідвальних перекриттів корівників після зміни режиму їх завантаження;
- розробити конструктивні рішення для забезпечення сприйняття збірними залізобетонними надпідвальними перекриттями корівників нових режимів завантаження.

Матеріали та методи

Обстежуваний об'єкт являв собою одноповерхові будівлі корівників з підвалом. Кожна з будівель корівників містить окремий заїзд в підвальне

приміщення, що використовувалось для накопичення гною (див. рис. 1).



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Об'ємно-планувальні рішення будівель корівників [1]
а) зовнішній вигляд будівлі корівника; б) зовнішній вигляд окремого заїзду в підвал будівлі корівника; в) внутрішній простір приміщення першого поверху будівлі корівника; г) конструкція збирного залізобетонного надпідвального перекриття; д) внутрішній простір підвального приміщення будівлі корівника; е) місце демонтажу плити надпідвального перекриття для дослідження вузла з'єднання ригеля, збирної колони 1-го поверху та монолітної колони підвального поверху

Результати та обговорення

В межах інструментального обстеження було проведено обмірні роботи згідно [2, 3] несучих конструкцій надпідвальних перекриттів будівельного об'єкту та встановлено, що всі чотири корівники №3, №4, №5 та №6 зведені за типовим експериментальним проектом та мають однакові об'ємно-планувальні рішення. На рис. 2 наведено обмірних план підвального поверху будівель корівників. Обмірні креслення надпідвального перекриття в місці обпирання на несучу збірну залізобетонну колону підвального поверху наведені на рис. 3.

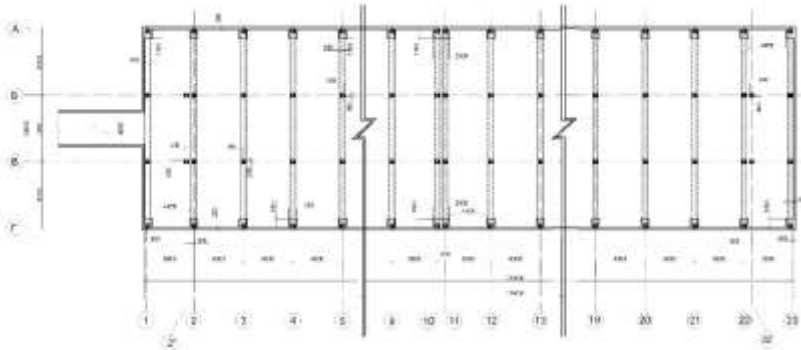


Рис. 2. Обмірний план підвального поверху будівлі корівника

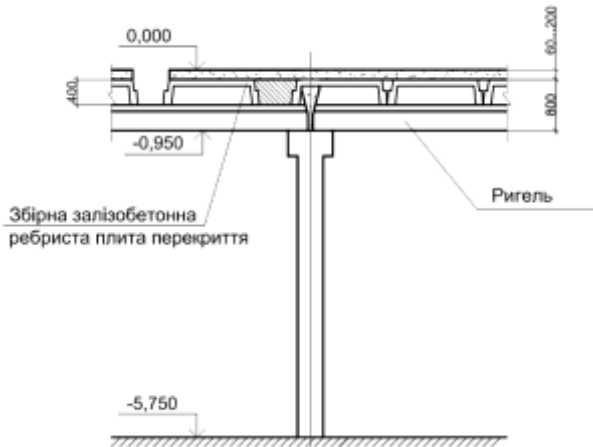


Рис. 3. Загальний вигляд конструкції збірного залізобетонного надпідвального перекриття в місці обпирання на несучу збірну залізобетонну колону підвального поверху

Інструментальні дослідження будівельних конструкцій проводилося на ділянках, що були обрані в процесі попереднього візуального огляду згідно [2, 3]. Для дослідження армування та визначення кубової міцності бетону було обрано шість збірних залізобетонних колон, шість збірних залізобетонних ригелів та шість збірних залізобетонних ребристих плит надпідвального перекриття в кожному із корівників. В кожній із конструкцій виконували дослідження армування магнітним методом. Результати дослідження армування колон, ригелів та плит перекриття наведені на рис. 4.

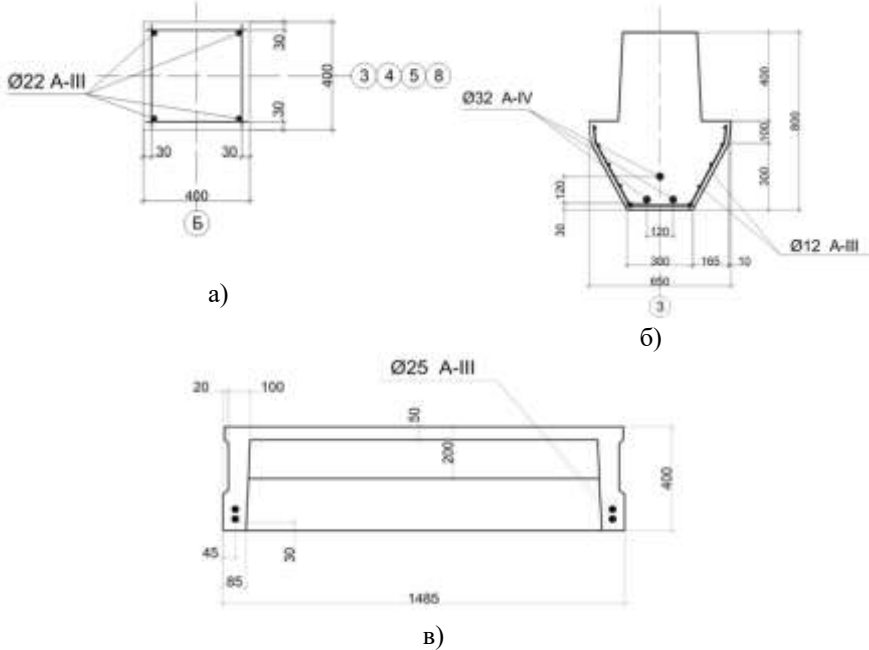


Рис. 4. Поперечний переріз та його армування збірних залізобетонних несучих конструкцій каркасу надпідвального перекриття: а) збірна залізобетонна колона центрального ряду підвального поверху; б) збірний залізобетонний ригель; в) ребриста плита перекриття

Вимірювання кубової міцності бетону збірних залізобетонних конструкцій проводилось методом ударного імпульсу. Середня кубова міцність бетону збірних залізобетонних колон знаходиться в межах від 43,5 МПа до 54,6 МПа, що відповідає класу міцності бетону С32/40 (марка бетону М400). Середня кубова міцність бетону збірних залізобетонних ригелів знаходиться в межах від 66,8 МПа до 81,7 МПа, що відповідає

класу міцності бетону C50/60 (марка бетону М600). Середня кубова міцність бетону збірних залізобетонних ребристих плит знаходиться в межах від 37,8 МПа до 45,2 МПа, що відповідає класу міцності бетону C30/35 (марка бетону М350).

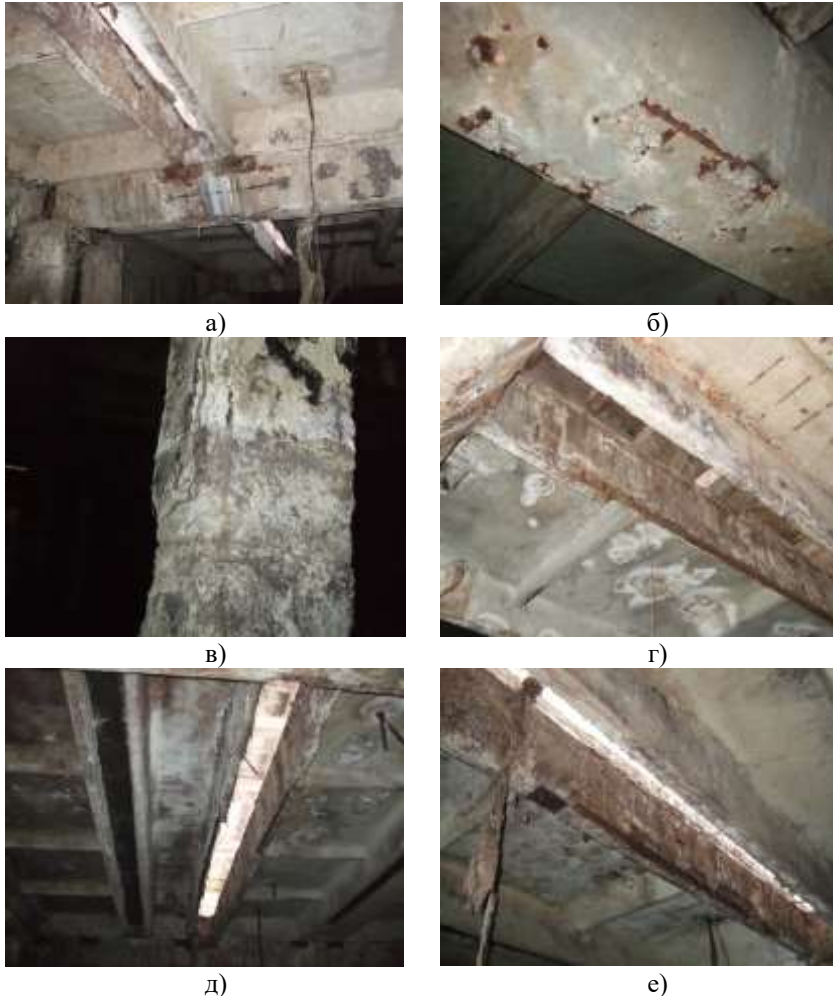


Рис. 5. Фотофіксація місць виявлених дефектів в несучих конструкціях надпідвального перекриття: а), б) корозія бетону та армування в збірних залізобетонних ригелях; в) корозія бетону в колонах; г), д), е) корозія бетону та армування в ребристих плитах в зоні прорізів для стікання ґною

За результатами візуального огляду згідно [1] та результатами інструментальних досліджень проведених в межах даних досліджень, обстежувані будівлі корівників №3, №4, №5 та №6 в цілому відносяться до III категорії (непридатний до подальшої експлуатації стан) згідно [2].

Для можливості подальшої надійної та безпечної експлуатації об'єкту необхідно провести капітальний ремонт або реконструкцію будівель корівників, в межах яких виконати наступні будівельні роботи, що стосуються надпідвальних перекриттів:

- очистити від продуктів корозії бетону і арматури збірні залізобетонні конструкції, що містять втрату поперечного перерізу робочого армування до 10% з подальшим відновленням перерізу;

- після перевірочних розрахунків, виконати підсилення збірних залізобетонних конструкцій, що містять втрату поперечного перерізу робочого армування більше ніж 10% внаслідок корозії, або виконати їх заміну.

Розрахунок збірного залізобетонного надпідвального перекриття виконувався методом скінчених елементів в ПК Ліра-Сапр. Навантаження, що будуть діяти на збірне залізобетонне надпідвальне перекриття після реконструкції представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Навантаження, що будуть діяти на збірне залізобетонне надпідвальне перекриття після реконструкції

№ з/п	Елемент	Кількість	Орієнтовна маса одиниці (кг)	Загальна маса (кг)	Примітка
1	2	3	4	5	6
1	Корови	400 голів	450	180000	Розміщення хаотичне, під час годівлі буде навантаження до 300 кг/м ² , у лежачах до 200 кг/м ²
2	Трактор	1	8000	8000	Прізд по кормовому столу одночасно позиції 2, 3, 4
3	Міксер	1	10000	10000	
4	Монокорм	1	10000	10000	
5	Бугіль, стовпчики, кріплення	400 шт	40	16000	Біля стійломісць
6	Мати	400 шт	50	20000	У стійломісцях
7	Гноєвидалення	4 шт	2000	8000	Чотири гноєві алеї
8	Поїлки з водою	8 шт	250	2000	

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6
9	Бетон кормовий стіл	$120 \times 4 \times 0,2 \text{ м}^3 = 96 \text{ м}^3$	2400	230400	
10	Бетон лежаки	$9,5 \times 100 \times 0,15 \text{ м}^3 = 142,5 \text{ м}^3$	2400	342000	
11	Бетон гноєва аляя	$10 \times 120 \times 0,15 \text{ м}^3 = 180 \text{ м}^3$	2400	432000	
12	Запас навантаження	10% від загальної маси			Можливість заїзду JCB, тощо

Допущення, які прийняті при розрахунку:

- геометричні розміри збірного залізобетонного надпідвального перекриття прийняті згідно обмірних креслень, що наведені на рис. 2 та 3;
- геометричні розміри конструкцій, з яких складається збірне залізобетонне надпідвальне перекриття, та параметри їх армування прийняті згідно обмірних креслень, що наведені на рис. 4;
- кубова міцність бетону збірних залізобетонних конструкцій надпідвального перекриття прийнята згідно експериментальних даних, отриманих в результаті інструментальних досліджень.

Максимально допустиме рівномірно розподілене навантаження на збірну залізобетонну ребристу плиту надпідвального перекриття за міцністю полиці складає $1,35 \text{ т/м}^2$ (див. рис. 6). Проте використання несучої здатності плити за міцністю поздовжнього ребра складає 31,6%, що створює запас міцності.

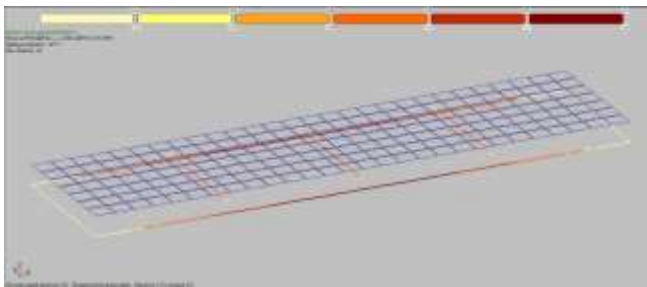


Рис. 6. Напруження 31,6% від максимально допустимих в поздовжніх ребрах збірної залізобетонної ребристої плити надпідвального перекриття при навантаженні $1,35 \text{ т/м}^2$

Для повного використання несучої здатності плити та можливості прикладання до перекриття навантажень, що передбачені в табл. 1

необхідно поверх збірних залізобетонних ребристих плит надпідвального перекриття влаштувати суцільну монолітну плиту, параметри якої підберемо нижче в розрахунку.

При розрахунку несучої здатності збірного залізобетонного каркасу підвального поверху, виконували порівняння фактичного армування конструкцій з розрахунковим, що необхідне для сприйняття навантажень, що наведені в табл. 1. Несуча здатність конструкції буде забезпечена у випадку, якщо фактичне армування конструкцій більше за отримане згідно розрахунку.

В розрахунку прийнято наступні розміри техніки, що наведені на рис. 7. Навантаження від трактора ділилося 40%/60% (перед/зад), навантаження від міксера з монокормом ділилося 30%/70% (трактор/міксер).



Рис. 7. Геометричні розміри між осями рухомих механізмів, що будуть рухатись по збірному залізобетонному перекритті

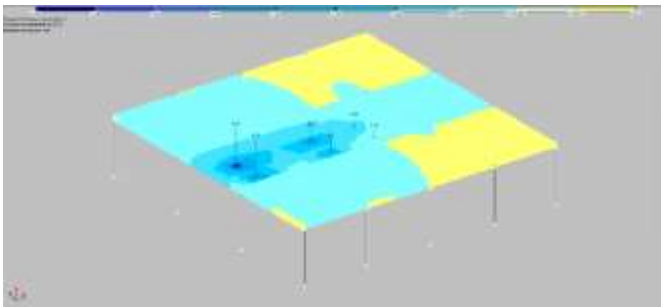


Рис. 8. Прогини перекриття від руху техніки. Місця прикладання, величини та положення прикладеного навантаження

Згідно проведених розрахунків несуча здатність збірних залізобетонних колон, ригелів та поздовжніх ребер плит перекриття достатня для сприйняття навантажень, що наведені в табл. 1.

Для сприйняття навантажень, що задані в табл. 1, необхідно по верх існуючого збірного залізобетонного надпідвального перекриття влаштувати розподільчу монолітну залізобетонну плиту: товщиною 120 мм, з бетону класу C25/30, армовану двома сітками вічком 200×200 мм з арматури класу А 400С діаметром 12 мм; або товщиною 140 мм, з бетону класу C25/30, армовану двома сітками вічком 200×200 мм з арматури класу А 400С діаметром 10 мм.

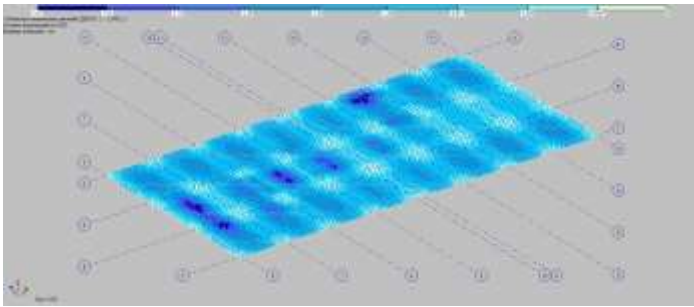


Рис. 9. Прогини розподільчої плити з врахуванням конструкції існуючого перекриття та власної ваги плити (показано максимальні по всіх комбінаціях навантажень одночасно)

Висновки

Були розглянуті результати інструментального обстеження надпідвального перекриття та підвалу будівель корівників. За сукупністю всіх показників визначення категорійності технічного стану всіх будівельних конструкцій і конструктивів об'єкта, обстежувані будівлі корівників відносяться до III категорії (непридатний до подальшої експлуатації стан).

Згідно проведеного інструментального обстеження неруйнівними методами контролю збірних залізобетонних конструкцій надпідвальних перекриттів, були отримані нові дані кубової міцності бетону колон, ригелів та плит перекриття, а також їх армування та ступінь втрати поперечного бетонного перерізу і армування в результаті впливу агресивного середовища.

Запропоновано рішення для можливості сприйняття нових режимів навантажень існуючими збірними залізобетонними надпідвальними перекриттями. Необхідно поверх існуючого збірного перекриття

влаштувати розподільчу монолітну залізобетонну плиту з наступними параметрами:

Варіант №1: товщиною 120 мм, з бетону класу С25/30, армовану двома сітками вічком 200×200 мм з арматури класу А 400С діаметром 12 мм;

Варіант №2: товщиною 140 мм, з бетону класу С25/30, армовану двома сітками вічком 200×200 мм з арматури класу А 400С діаметром 10 мм.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Kononchuk O.P. Tekhnichne obstezhennia budivel korivnykiv, shcho mistiat pidvalnyi poverkh na predmet mozhyvosti demontazhu nadpidvalnoho perekryttia // Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy: zb. nauk. pr. – Rivne: NUVHP, 2024. – Вуп. 45. – S. 345 – 354.

2. DSTU 9273:2024. Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsiniuvannia yikhnoho tekhnichnoho stanu. Mekhanichniy opir ta stiikist. Kyiv, 2024.

3. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 12 kvitnia 2017 roku №257 Poriadok provedennia obstezhennia pryiniatykh v ekspluatatsiiu ob'ektiv budivnytstva.

4. Drobyshynets, S., Uzhehova, O., Bondarskyi, O., Uzhehov, S., Rotko S., & Deneichuk, V. (2025). Rezultaty obstezhennia konstruksii prybudovy do korpusu hromadskoi budivli u m. Lutsk. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi, 22, 57-66. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-06](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-06)

5. Bondarskyi, O., Drobyshynets, S., Luchynets, S., Rotko, S., & Uzhehova, O. (2023). Tekhnichne obstezhennia zalizobetonnykh konstruksii. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi, 19, 22-32. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9\(19\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9(19)-03)

6. Uzhehov, S. O., Uzhehova, O. A., Bondarskyi, O. H., Zadorozhnikova, I. V., & Aleksieievets, V. (2025). Vyznachennia trymkoi zdatnosti zalizobetonnykh kolon.

Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi, 24, 539-552.
[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-46](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-46)

7. Ninichuk, M., Rotko, S. V., Pasichnyk, R., Parfentieva, I., & Ivaniuk, A. (2025). Tekhnichne obstezhennia i vyznachennia nesuchoi zdatnosti monolitnykh kolon i shynnykh balok fundamentiv kartonnorobnoi mashyny Fampa kartonno-paperoovoho tsekhu. Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi, 24, 235-243.
[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-19](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-19)

Література

1. Конончук О.П. Технічне обстеження будівель корівників, що містять підвальний поверх на предмет можливості демонтажу надпідвального перекриття // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2024. – Вип. 45. – С. 345 – 354.

2. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. Київ, 2024.

3. Постанова Кабінету Міністрів України від 12 квітня 2017 року №257 Порядок проведення обстеження прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва.

4. Дробишинець, С., Ужєгова, О., Бондарський, О., Ужєгов, С., Ротко С., & Денейчук, В. (2025). Результати обстеження конструкцій прибудови до корпусу громадської будівлі у м. Луцьк. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 22, 57-66. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-06](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-06)

5. Бондарський, О., Дробишинець, С., Лучинець, С., Ротко, С., & Ужєгова, О. (2023). Технічне обстеження залізобетонних конструкцій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 19, 22-32. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9\(19\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9(19)-03)

6. Ужєгов, С. О., Ужєгова, О. А., Бондарський, О. Г., Задорожнікова, І. В., & Алексієвєць, В. (2025). Визначення тримкої здатності залізобетонних колон. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 539-552.
[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-46](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-46)

7. Нінічук, М., Ротко, С. В., Пасічник, Р., Парфєнтєвєва, І., & Іванюк, А. (2025). Технічне обстеження і визначення несучої здатності монолітних колон і шинних балок фундаментів картонноробної машини Fampa картонно-паперового цеху. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 235-243.
[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-19](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-19)

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 26.04.2026	Received 26.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 30.04.2026	Received in revised form 30.04.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

О. П. Kononchuk*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3601-8352>
Department of Structural Mechanics
Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, 56 Ruska str., Ternopil, Ukraine, 46001

Stress-strain state of reinforced concrete basement floors of cowsheds after changing the loading regime

How to Cite:

Kononchuk, O. P. (2026). Stress-strain state of reinforced concrete basement floors of cowsheds after changing the loading regime. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 102-114. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-08](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-08)

© 2026, Kononchuk O. P.

Abstract. The article presents the results of a detailed instrumental examination of the load-bearing structures of prefabricated reinforced concrete basement floors of cowshed buildings No. 3, No. 4, No. 5 and No. 6, located at Adamkivska Street, Building 1 in the village of Zorya, Rivne district, Rivne region. Within the framework of these studies, measurements of the load-bearing structures of basement floors and basements of buildings were performed with the preparation of the corresponding drawings. Using non-destructive testing methods, the cubic strength of concrete of columns, beams and floor slabs was determined. Their reinforcement, the degree of loss of cross-section of concrete and reinforcement as a result of the influence of an aggressive environment were also investigated. Based on the data obtained, a set of measures to restore the initial properties of the structures was proposed. The stress-strain state of basement floors of cowshed buildings under the action of new loading modes on them from the new method of keeping cows, as well as from the use of new modern equipment was analyzed. Constructive solutions for the restoration and reinforcement of the structure of prefabricated reinforced concrete floors are proposed, which will make it possible to perceive the loads that will act after the reconstruction of buildings. Using the PC Lira-Sapr, the finite element method was used to model the operation of the prefabricated reinforced concrete frame of the above-basement floor of buildings, taking into account new types of loads. A monolithic reinforced concrete distribution slab was calculated on top of the existing floor to transfer new loads to existing structures. The use of such a solution allowed to preserve the existing floor and use its residual resource for further safe and reliable operation of the cowshed buildings.

Keywords: instrumental survey, cowsheds, overlaps, verification calculation, finite element method, reinforcement.

УДК 628.354:628.312

І. В. Кобилко*

Аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3663-8065>

Кафедра водопостачання, водовідведення та бурової справи

Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, Рівне, Україна, 33028

*автор-кореспондент, e-mail: i.v.kobylo@nuwm.edu.ua

Симультанна нітрифікація-денітрифікація в SBR з плаваючими EPS-носіями для молочних стічних вод

Цитувати як:

Кобилко, І. В. (2026). Симультанна нітрифікація-денітрифікація в SBR з плаваючими EPS-носіями для молочних стічних вод. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 115-123. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-09](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-09)

© 2026, Автор. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті представлено результати експериментального дослідження та математичного моделювання процесу симультанної нітрифікації-денітрифікації (СНД) у системі IFAS-SBR з плаваючим завантаженням з гранульованого пінополістиролу (EPS) для очищення стічних вод молокопереробного підприємства з низьким співвідношенням C/N = 3,0–3,5. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю виконання Директиви ЄС 91/271/ЄЕС щодо обмеження скидів сполук азоту й відсутністю в літературі систематизованих даних про роботу IFAS-систем у діапазоні C/N < 4, характерному для молочних стоків. Порівняльний аналіз двох паралельних лабораторних реакторів з EPS-завантаженням (30 % об'єму, питома поверхня 550 м²/м³, гранули діаметром 3–5 мм) та контрольного — проведено на реальних стічних водах ДП «Ружин-молоко» (продуктивність 300 м³/добу) упродовж 2023–2024 років за стабільної температури 20 °С, MLSS = 3,5 г/л, тривалості циклу SBR 6 год. Встановлено оптимальний діапазон DO = 0,8–1,2 мг/л (з максимумом ефективності при DO = 1,0 мг/л), за якого всередині біоплівки формується стійкий двошаровий аеробно-аноксидний градієнт. Ефективність видалення загального азоту TN сягала 86,5 % (проти 76,0 % у контрольному реакторі без EPS); вихідні концентрації NH₄⁺-N = 1,5 мг/л та TN = 6,5 мг/л відповідають вимогам ДСТУ 7525:2014. Завдяки роботі при низькому DO питома енергоспоживання на аерацію зменшено на 37,5 %. Процес описано модифікованою моделлю активного мулу ASM3_2N, верифікованою у середовищі AQUASIM 2.0 з похибкою RMSE ≤ 12,3 %. Отримані результати можуть бути використані для проектування та модернізації локальних очисних споруд малої та середньої потужності на молокопереробних підприємствах.

Ключові слова: симультанна нітрифікація-денітрифікація, IFAS-SBR, пінополістирол, біоплівка, ASM3, молочні стоки.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

Евтрофікація поверхневих водних об'єктів унаслідок надходження надлишкових концентрацій сполук азоту залишається однією з ключових екологічних проблем у Центральній та Східній Європі [1]. Директива ЄС 91/271/ЄЕС встановлює вимогу щодо концентрації загального азоту у скидах стічних вод не більше 10–15 мг/л або ефективності його видалення не менше 70–80 % [2]. В умовах євроінтеграційного курсу України досягнення цих показників є не лише екологічним, а й регуляторним пріоритетом.

Особливо складними для біологічного очищення є стічні води молокопереробних підприємств, яким властиве низьке співвідношення $C/N = 3,0-4,5$. У цьому діапазоні традиційні послідовні схеми нітрифікації-денітрифікації з просторовим розділенням аеробної та аноксидної зон зазвичай вимагають додавання зовнішніх джерел органічного вуглецю — метанолу або оцтової кислоти, що суттєво підвищує операційні витрати [3]. Проблема ускладнюється тим, що попри формально високе загальне БСК₅, значна частина органіки в молочних стоках представлена білково-жировими компонентами, які повільно гідролізуються і переважно споживаються гетеротрофами в аеробній фазі — тобто не є доступними для денітрифікаторів.

Технологія симультанної нітрифікації-денітрифікації (СНД) дозволяє поєднати обидва процеси в єдиному реакторному просторі. Фізичною основою СНД є виникнення градієнту кисню всередині біоплівки або мулових флокул: при відносно низьких концентраціях $DO = 0,3-1,5$ мг/л зовнішні шари залишаються аеробними, а внутрішні переходять в аноксидний стан [4, 5]. Реалізація цього механізму, однак, вимагає точного контролю концентрації розчиненого кисню — невеликі відхилення можуть суттєво змінити баланс між нітрифікацією та денітрифікацією.

Системи типу IFAS (Integrated Fixed-Film Activated Sludge) поєднують переваги зваженого активного мулу та прикріпленої біоплівки. Плаваючі EPS-носії (гранульований пінополістирол) привертають увагу завдяки низькій вартості, хімічній інертності та розвиненій питомій поверхні [6, 7]. Останні роботи з IFAS/MBBR (2023) підтверджують, що оптимальна робота досягається в режимах з пониженим DO та підвищеною ємністю біоплівки [8, 9, 10].

Більшість опублікованих досліджень СНД в IFAS-системах виконано для стічних вод з $C/N > 4$, де денітрифікація протікає більш стабільно [4, 5, 11]. Роботи для $C/N \approx 3,0-3,5$, характерного для молочних стоків, залишаються поодинокими [12]. Крім того, дані з верифікації

математичних моделей родини ASM для таких умов у відкритій літературі майже відсутні, що ускладнює проєктування без проведення власних досліджень.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є експериментальне обґрунтування та математичне моделювання ефективності процесу СНД у системі IFAS-SBR з плаваючим EPS-завантаженням для очищення стічних вод молокопереробних підприємств з низьким C/N. Завдання дослідження: (1) охарактеризувати стічні води об'єкта досліджень; (2) провести порівняльний експеримент у паралельних SBR-реакторах; (3) визначити робочий діапазон DO; (4) верифікувати модель ASM3_2N у середовищі AQUASIM 2.0.

Матеріали та методи

Дослідження проводились на реальних стічних водах молокопереробного підприємства ДП «Ружин-молоко» (смт Ружин, Житомирська обл.; продуктивність 300 м³/добу). Проби відбирались щоденно з приймальної камери після решіток та піскоуловлювачів у ранковий час (8:00–9:00) та доставлялись до лабораторії протягом 2–3 годин. Характеристику стічних вод наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Характеристика стічних вод ДП «Ружин-молоко»

Показник	Од. вим.	Діапазон	Середнє
pH	–	5,6–6,8	6,2
t	°C	16–24	20
ХПК	мг О ₂ /л	2800–5200	4116
БСК ₅	мг О ₂ /л	2100–4500	3335
NH ₄ ⁺ -N	мг/л	25–48	35
NO ₃ ⁻ -N	мг/л	0,2–1,5	0,7
TN	мг/л	32–60	46
Рзаг.	мг/л	12–28	19
Жири	мг/л	85–340	180

Як видно з таблиці 1, стічні води характеризуються значним вмістом органічних забруднень при порівняно невисокій концентрації амонійного азоту. Середнє значення БСК₅/NH₄⁺-N = 3,35 суттєво нижче рекомендованого мінімуму 5–7 для ефективної денітрифікації без зовнішнього субстрату [13].

Розглянемо схему та умови експерименту. Порівняльний експеримент проводився у двох ідентичних SBR-реакторах об'ємом 8 л кожен: контрольний SBR-C (лише активний мул) та дослідний SBR-EPS (активний мул + EPS-завантаження 30 % об'єму). Температура

підтримувалась 20 ± 1 °C, рН 6,5–7,2, MLSS = 3,5 г/л, тривалість циклу 6 год (наповнення 0,5 год, аерація 4 год, відстоювання 1,5 год, декантація 0,5 год).

Перед основним експериментом обидва реактори пройшли 21-добовий акліматизаційний період. Перші 7 діб активний мул (взятий з аераційного танку міських очисних споруд м. Рівне) адаптувався до складу молочних стічних вод за повної аерації (DO = 2,0–2,5 мг/л). Надалі DO поступово знижували до цільового рівня 1,0 мг/л кроком приблизно 0,15 мг/л на добу.

Характеристики EPS-завантаження: гранули сферичної форми, $d = 3\text{--}5$ мм (сер. $4,0 \pm 0,5$ мм), питома площа поверхні 550 ± 50 м²/м³, щільність 25 ± 5 кг/м³. Концентрацію DO підтримував автоматичний ПІД-регулятор. Визначення NH₄⁺-N виконувалось фотометричним методом з реактивом Несслера, NO₃⁻-N та NO₂⁻-N – іонною хроматографією, TN – хемілюмінесцентним аналізом, БСК₅ та ХПК – стандартними методами; відбір та консервування проб – за ДСТУ EN ISO 5667-3:2025 [14].

Результати та обговорення

Залежність ефективності видалення азоту від DO у діапазоні 0,3–1,5 мг/л наведено в таблиці 2. Спостерігається виражена нелінійна залежність: зростання DO від 0,3 до 1,0 мг/л супроводжується різким покращенням показників нітрифікації, тоді як подальше збільшення (від 1,0 до 1,5 мг/л) призводить до погіршення денітрифікаційної активності.

Таблиця 2. Вплив концентрації розчиненого кисню на ефективність видалення азоту

DO, мг/л	NH ₄ ⁺ -N вих. (IFAS), мг/л	TN вих. (IFAS), мг/л	TN вих. (контр.), мг/л	Еф. TN (IFAS), %
0,3	12,4	28,1	32,5	41,5
0,5	6,8	14,2	20,3	70,4
0,8	2,1	8,3	12,1	82,7
1,0*	1,5	6,5	11,4	86,5
1,2	1,8	7,9	12,8	83,5
1,5	1,5	11,3	15,9	76,4

* оптимальне значення DO

При DO = 1,0 мг/л (оптимум) ефективність видалення TN у системі IFAS-SBR становила 86,5 %, що на 13,8 в. п. вище, ніж у контролі (76,0 %). При DO нижче 0,5 мг/л різко зростає концентрація NH₄⁺-N у вихідному стоці — до 6,8 мг/л, що порушує норматив ДСТУ 7525:2014 [15] (NH₄⁺-N ≤ 2 мг/л).

Проаналізуємо структуру біоплівки та механізм СНД. Мікроскопічний аналіз (конфокальна лазерна сканувальна мікроскопія) виявив двошарову структуру біоплівки на EPS-носіях при $DO = 1,0$ мг/л: зовнішній аеробний шар 50–100 мкм з переважанням нітрифікаторів (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*) та внутрішній аноксидний шар 100–300 мкм з денітрифікаторами.

Застосування EPS-завантаження підвищило питому швидкість нітрифікації на 40 %: 0,028 г N/(г VSS·год) у SBR-EPS проти 0,020 г N/(г VSS·год) у SBR-C. Досягнутий приріст ефективності видалення TN (13,8 в. п.) є дещо нижчим, ніж у недавніх роботах з аналогічними системами для очищення молочних стоків (15–20 в. п.) [12].

Підтримання $DO = 0,8$ – $1,2$ мг/л дозволило знизити питоме енергоспоживання на аерацію з 0,48 до 0,30 кВт·год/м³. За продуктивності 300 м³/добу це відповідає річній економії близько 6500 кВт·год.

Розглянемо математичне моделювання процесів СНД. Для опису процесів використано модель ASM3_2N — модифіковану версію ASM3 з двоступеневою нітрифікацією-денітрифікацією [16]. Чисельне розв'язання системи диференціальних рівнянь виконано у програмному середовищі AQUASIM 2.0 (Eawag, Швейцарія) методом нелінійних найменших квадратів з алгоритмом Marquardt-Levenberg.

Кінетику нітрифікації описано двосубстратним рівнянням Моно [17] (рівняння 1):

$$\mu_{NH_4} = \mu_{max} \cdot [NH_4^+ - N / (K_S, NH + NH_4^+ - N)] \cdot [DO / (K_O, AOB + DO)] \quad (1)$$

де μ_{max} — максимальна питома швидкість росту нітрифікаторів, год⁻¹; K_S, NH — константа Моно для $NH_4^+ - N$, мг/л; K_O, AOB — константа напівнасичення для DO у нітрифікаторів, мг O_2 /л.

Найбільш суттєве відхилення від стандартних значень ASM3_2N отримано для максимальної питомої швидкості росту нітрифікаторів: $\mu_{max, AOB}$ збільшено з 0,040 до 0,045 год⁻¹. Константу напівнасичення K_O, AOB знижено з 0,75 до 0,50 мг O_2 /л.

Статистичні показники верифікації: для SBR-EPS – RMSE = 11,8 % для $NH_4^+ - N$ та NSE = 0,89; для SBR-C – RMSE = 12,3 % та NSE = 0,86. Значення NSE > 0,80 прийнято як критерій задовільної якості моделі [16].

Висновки

1. Система IFAS-SBR з плаваючим EPS-завантаженням ($d = 3$ – 5 мм, питома поверхня 550 м²/м³, доза 30 % від об'єму реактора) в лабораторних умовах забезпечила ефективність видалення загального азоту TN = 86,5 % та $NH_4^+ - N \leq 1,5$ мг/л при $C/N \approx 3,0$ – $3,5$ без застосування зовнішнього вуглецевого субстрату, що відповідає ДСТУ 7525:2014 [15] та Директиві ЄС 91/271/ЄЕС [2].

2. Встановлено робочий діапазон DO = 0,8–1,2 мг/л (оптимум 1,0 мг/л), за якого формується двошарова структура біоплівки. Зниження DO до цього рівня дозволяє зменшити питоме енергоспоживання на аерацію на 37,5 %.

3. EPS-завантаження підвищило питому швидкість нітрифікації на 40 %: 0,028 г N/(г VSS·год) проти 0,020 г N/(г VSS·год) у контролі.

4. Модель ASM3 2N, верифікована у середовищі AQUASIM 2.0 в умовах C/N = 3,0–3,5 (RMSE ≤ 12,3 %, NSE ≥ 0,86), може розглядатись як перспективний інструмент для попередніх розрахунків при проєктуванні очисних споруд молокопереробних підприємств.

5. Усі наведені результати отримано в лабораторному масштабі (V = 8 л) при стабільній температурі 20 °С. Екстраполяція на повномасштабні очисні споруди потребує проведення пілотних випробувань.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що не має конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на результати, наведені в цьому документі. Науковий керівник автора статті: Ковальчук Володимир Анатолійович, доктор технічних наук, професор кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне, Україна).

Фінансування

Дослідження проводилося в рамках науково-дослідної роботи кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи Національного університету водного господарства та природокористування без окремого фінансування з зовнішніх джерел.

Доступність даних

Усі експериментальні дані, на яких ґрунтуються висновки цієї роботи, наведено в основному тексті статті у графічній і табличній формах.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи технології штучного інтелекту для генерації наукового змісту не використовувалися.

References

1. European Environment Agency. (2018). European waters: assessment of status and pressures 2018. EEA Report No 7/2018. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 90 p.
2. Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. Official Journal of the European Communities, L 135/40, 30.05.1991. 8 p.
3. Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., & Brdjanovic, D. (2008). Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. London: IWA Publishing, 528 p. <https://doi.org/10.2166/9781780401867>
4. Pochana, K., & Keller, J. (1999). Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND). Water Science and Technology, 39(6), 61–68. <https://doi.org/10.2166/wst.1999.0259>

5. Liu, Y., & Tay, J.-H. (2002). The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge. *Water Research*, 36(7), 1653–1665. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00379-7)
6. Germain, E., Bancroft, L., Dawson, A., Hinton, C., Holloway, J., & Pearce, P. (2007). Evaluation of hybrid processes for nitrification by comparing MBBR/AS and IFAS configurations. *Water Science and Technology*, 55(8–9), 43–49. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.240>
7. McQuarrie, J.P., & Boltz, J.P. (2011). Moving bed biofilm reactor technology: process applications, design, and performance. *Water Environment Research*, 83(6), 560–575. <https://doi.org/10.2175/106143010X12851009156286>
8. Rusten, B., & Ødegaard, H. (2023). Nitrogen removal in moving-bed biofilm reactor plants at low temperatures: experiences from Norway. *Water Science and Technology*, 87(10), 2432–2440. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.154>
9. Bhattacharya, R., & Mazumder, D. (2023). Performance evaluation of moving bed bioreactor for simultaneous nitrification denitrification and phosphorus removal. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 49060–49074. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25708-z>
10. Bhattacharya, R., & Mazumder, D. (2023). Development of a simplistic mathematical model for SND in moving bed bioreactor. *Environmental Modeling & Assessment*, 28(5), 873–887. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09874-5>
11. Münch, E.V., Lant, P., & Keller, J. (1996). Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors. *Water Research*, 30(2), 277–284. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00200-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00200-6)
12. Lúcio, D.S.G., Dias, M.E.S., Ribeiro, R., & Tommaso, G. (2023). Evaluating the potential of a new reactor configuration to enhance simultaneous organic matter and nitrogen removal in dairy wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 56741–56755. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26341-6>
13. Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). New York: McGraw-Hill, 2048 p.
14. DSTU EN ISO 5667-3:2025. Yakist vody. Vidbyrannia prob. Chastyna 3. Konservuvannia ta povodzhennia zi zrazkamy vody. (2025). Kyiv: SE "UkrNDNTs". 35 p.
15. DSTU 7525:2014. Voda pytna. Vymohy ta metody kontroliuvannia yakosti. (2014). Kyiv: Ministry of Economic Development of Ukraine. 25 p.
16. Iacopozzi, I., Innocenti, V., Marsili-Libelli, S., & Giusti, E. (2007). A modified Activated Sludge Model No. 3 (ASM3) with two-step nitrification-denitrification. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 847–861. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.04.008>
17. Monod, J. (1949). The growth of bacterial cultures. *Annual Review of Microbiology*, 3, 371–394. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>

Література

1. European Environment Agency. European waters: assessment of status and pressures 2018 : EEA Report No 7/2018. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2018. 90 p.
2. Директива Ради 91/271/ЄС від 21.05.1991 про очистку міських стічних вод. Офіційний вісник Європейських Співтовариств. 1991. L 135/40. 8 с.
3. Henze M., van Loosdrecht M.C.M., Ekama G.A., Brdjanovic D. *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. London : IWA Publishing, 2008. 528 p. URL: <https://doi.org/10.2166/9781780401867>

4. Pochana K., Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND). *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 39, № 6. P. 61–68. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.1999.0259>

5. Liu Y., Tay J.-H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge. *Water Research*. 2002. Vol. 36, № 7. P. 1653–1665. URL: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00379-7)

6. Germain E., Bancroft L., Dawson A., Hinton C., Holloway J., Pearce P. Evaluation of hybrid processes for nitrification by comparing MBBR/AS and IFAS configurations. *Water Science and Technology*. 2007. Vol. 55, № 8–9. P. 43–49. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2007.240>

7. McQuarrie J.P., Boltz J.P. Moving bed biofilm reactor technology: process applications, design, and performance. *Water Environment Research*. 2011. Vol. 83, № 6. P. 560–575. URL: <https://doi.org/10.2175/106143010X12851009156286>

8. Rusten B., Ødegaard H. Nitrogen removal in moving-bed biofilm reactor plants at low temperatures: experiences from Norway. *Water Science and Technology*. 2023. Vol. 87, № 10. P. 2432–2440. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2023.154>

9. Bhattacharya R., Mazumder D. Performance evaluation of moving bed bioreactor for simultaneous nitrification denitrification and phosphorus removal. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, № 17. P. 49060–49074. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25708-z>

10. Bhattacharya R., Mazumder D. Development of a simplistic mathematical model for SND in moving bed bioreactor. *Environmental Modeling & Assessment*. 2023. Vol. 28, № 5. P. 873–887. URL: <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09874-5>

11. Münch E.V., Lant P., Keller J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors. *Water Research*. 1996. Vol. 30, № 2. P. 277–284. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00200-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00200-6)

12. Lúcio D.S.G., Dias M.E.S., Ribeiro R., Tommaso G. Evaluating the potential of a new reactor configuration to enhance simultaneous organic matter and nitrogen removal in dairy wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 56741–56755. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26341-6>

13. Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous G., Stensel H.D., Tsuchihashi R., Burton F. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2014. 2048 p.

14. ДСТУ EN ISO 5667-3:2025. Якість води. Відбирання проб. Частина 3. Консервування та поводження зі зразками води. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2025. 35 с.

15. ДСТУ 7525:2014. Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 25 с.

16. Iacopozzi I., Innocenti V., Marsili-Libelli S., Giusti E. A modified Activated Sludge Model No. 3 (ASM3) with two-step nitrification-denitrification. *Environmental Modelling & Software*. 2007. Vol. 22, № 6. P. 847–861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.04.008>

17. Monod J. The growth of bacterial cultures. *Annual Review of Microbiology*. 1949. Vol. 3. P. 371–394. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 26.04.2026	Received 26.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 12.05.2026	Received in revised form 12.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

I. V. Kobylyko*

Postgraduate student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3663-8065>

Department of Water Supply, Sewerage and Drilling Engineering

National University of Water and Environmental Engineering, Soborna St., 11, Rivne, Ukraine, 33028

*corresponding author, e-mail: i.v.kobylyko@nuwm.edu.ua

Simultaneous nitrification-denitrification in SBR with floating EPS carriers for dairy wastewater

How to Cite:

Kobylyko I. V. (2026). Simultaneous nitrification-denitrification in SBR with floating EPS carriers for dairy wastewater. *Modern Technologies and Methods of Calculations in Construction*, 25, 115-123. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-09](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-09)

Abstract. The article presents the results of an experimental study and mathematical modelling of simultaneous nitrification-denitrification (SND) in an IFAS-SBR system with floating expanded polystyrene (EPS) carriers for treatment of dairy wastewater characterised by a low C/N ratio of 3.0–3.5. The relevance of the study is justified by the need to comply with EU Council Directive 91/271/EEC concerning nitrogen discharges and by the lack of systematic data in the literature on the performance of IFAS systems in the C/N < 4 range typical for dairy wastewater. Two parallel laboratory reactors — one loaded with 30 % by volume of EPS carriers (specific surface area 550 m²/m³, granule diameter 3–5 mm) and a control reactor without EPS — were compared using real wastewater from the SE «Ruzhyn-Moloko» dairy enterprise (capacity 300 m³/day) during 2023–2024 at a stable temperature of 20 °C, MLSS = 3.5 g/L and an SBR cycle duration of 6 h. The optimal range of dissolved oxygen concentration was determined as DO = 0.8–1.2 mg/L (with the maximum efficiency at DO = 1.0 mg/L), at which a stable two-layer biofilm structure is formed: an outer aerobic layer (0–100 μm) hosting nitrifiers and an inner anoxic layer (100–300 μm) hosting denitrifiers. Total nitrogen removal efficiency reached 86.5 % (compared to 76.0 % in the control reactor without EPS); effluent concentrations of NH₄⁺-N = 1.5 mg/L and TN = 6.5 mg/L meet the requirements of DSTU 7525:2014. Operation under low DO conditions reduced specific aeration energy consumption by 37.5 % compared to conventional schemes. The process was described by the modified activated sludge model ASM3_2N verified in AQUASIM 2.0 with RMSE ≤ 12.3 % and NSE ≥ 0.86. The obtained results may be used for the design and modernisation of local wastewater treatment plants of small and medium capacity at dairy processing enterprises.

Keywords: simultaneous nitrification-denitrification, IFAS-SBR, expanded polystyrene, biofilm, ASM3, dairy wastewater.

УДК 69.003:658.7:519.85

О. С. Коваленко*

аспірант 4-го курсу, ORCID <https://orcid.org/0009-0005-2224-4174>

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Запорізький національний університет, просп. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006

*автор-кореспондент, e-mail: 22bendera.s@gmail.com

Багатокритеріальна математична модель оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві

Цитувати як:

Коваленко, О. С. (2026). Багатокритеріальна математична модель оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 25, 124-139. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-10](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-10)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті досліджено проблему підвищення ефективності організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві на основі багатокритеріального математичного моделювання. Визначено, що традиційні підходи до календарно-ресурсного планування не завжди забезпечують узгодження строків виконання робіт, ресурсних потреб, можливостей постачання, складської місткості та пропускну здатності логістичних вузлів. Це зумовлює необхідність моделі, здатної одночасно враховувати часові, вартісні, ресурсні, просторові та надійнісні параметри будівельного процесу.

Метою дослідження є обґрунтування багатокритеріальної математичної моделі оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві, яка забезпечує формалізоване узгодження тривалості виконання робіт, сукупних логістичних витрат, надійності забезпечення ресурсами та ресурсної збалансованості. Методологічну основу дослідження становлять положення системного аналізу, параметризації будівельної логістики, структурно-функціонального моделювання та багатокритеріальної оптимізації.

У роботі запропоновано структуру математичної моделі, що охоплює систему вхідних параметрів, змінних рішення, цільових функцій та обмежень. Як основні критерії оптимізації визначено мінімізацію тривалості виконання робіт, мінімізацію сукупних логістичних витрат, максимізацію надійності постачання ресурсів і підвищення ресурсної збалансованості. Модель враховує технологічні залежності між роботами, потребу в ресурсах, часові вікна доставки, обмеження складської місткості, пропускну здатність логістичних вузлів і готовність фронтів робіт.

Розрахункова апробація запропонованої моделі виконана шляхом порівняння традиційного календарно-ресурсного сценарію з оптимізаційним організаційно-логістичним сценарієм. Отримані результати показали скорочення тривалості реалізації проєкту з 395 до 381,91 дня, зниження сукупних логістичних витрат з 7

581 684,17 грн до 7 257 551,01 грн, підвищення надійності забезпечення ресурсами з 0,51 до 0,8460 та покращення ресурсної збалансованості з 0,86 до 0,8815.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості формування множини допустимих компромісних організаційно-логістичних альтернатив, що можуть бути використані для підтримки прийняття управлінських рішень під час планування, коригування та реалізації цивільних будівельних проєктів.

Ключові слова: цивільне будівництво, організаційно-логістичні процеси, багатокритеріальна оптимізація, будівельна логістика, Парето-ефективні рішення.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Питання підвищення ефективності організації будівельного виробництва, оптимізації організаційно-технологічних рішень, ресурсного забезпечення та управління будівельними процесами розглядалися у працях багатьох вітчизняних і зарубіжних дослідників. Зокрема, у роботах І. А. Арутюнян, В. І. Аніна, І. Д. Павлова, М. О. Полтавця, А. В. Радкевича, О. А. Тугая та інших науковців обґрунтовано необхідність системного підходу до організації будівництва, удосконалення календарно-ресурсного планування, підвищення організаційно-технологічної надійності та раціонального використання трудових, матеріальних і технічних ресурсів [1–5].

У сучасних умовах традиційні підходи до організації будівельного виробництва, що переважно орієнтовані на календарну послідовність робіт і нормативне ресурсне забезпечення, не завжди враховують складність логістичних зв'язків між учасниками будівельного процесу. Особливо це проявляється в умовах обмеженості будівельного майданчика, нестабільності постачання матеріально-технічних ресурсів, необхідності скорочення строків виконання робіт і підвищення вимог до узгодженості управлінських рішень. Застосування системного підходу та методів моделювання дозволяє розглядати будівельний проєкт як складну систему взаємопов'язаних технологічних, ресурсних, логістичних та управлінських процесів [3; 4; 6].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням логістичного інструментарію, Lean Construction, управління ланцюгами постачання та цифрових засобів підтримки будівельних процесів. У працях L. Koskela, G. Ballard, R. Vrijhoef, L. Koskela, R. Sacks та інших дослідників показано, що підвищення ефективності будівництва значною мірою залежить від узгодження матеріальних, інформаційних і виробничих потоків, зменшення втрат, своєчасного постачання ресурсів і покращення координації між учасниками проєкту [7–12]. У цьому контексті будівельна

логістика виступає не лише допоміжною функцією постачання, а й інструментом забезпечення ритмічності, безперервності та адаптивності будівельного процесу.

Разом із тим аналіз наукових джерел свідчить, що значна частина існуючих підходів зосереджена або на календарно-мережевому плануванні, або на ресурсному забезпеченні, або на окремих логістичних операціях. Недостатньо розробленим залишається комплексний підхід, який одночасно враховує технологічні залежності між роботами, часові вікна доставки, складську місткість будівельного майданчика, пропускну здатність логістичних вузлів, надійність постачання та ресурсну збалансованість. Водночас саме поєднання цих параметрів є необхідною умовою для формування реалістичних організаційно-логістичних сценаріїв у цивільному будівництві [1; 5; 11; 12].

Наукова новизна запропонованого підходу полягає в адаптації багатокритеріального математичного моделювання до задачі організаційно-логістичної оптимізації цивільного будівництва шляхом одночасного врахування тривалості виконання робіт, сукупних логістичних витрат, надійності забезпечення ресурсами та ресурсної збалансованості. На відміну від наявних підходів [13–17], які переважно зосереджені на загальних алгоритмах багатокритеріальної оптимізації, розміщенні ресурсів, BIM/GIS або компромісі між часом, вартістю та якістю, запропонована модель додатково враховує часові вікна доставки, складську місткість, пропускну здатність логістичних вузлів і готовність фронтів робіт. Це дозволяє оцінювати практично допустимі організаційно-логістичні сценарії.

Одним із способів вирішення зазначеної проблеми є застосування багатокритеріальної оптимізації, яка дозволяє оцінювати організаційно-логістичні рішення не за одним показником, а за системою взаємопов'язаних критеріїв. У дослідженнях К. Deb, С. А. Coello Coello та інших авторів обґрунтовано підходи до розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, формування Парето-ефективних рішень і підтримки прийняття рішень в умовах конфліктності критеріїв [13; 14]. Застосування багатокритеріального підходу до задач будівельного планування та організації будівельного майданчика також розглянуто у працях, присвячених оптимізації розміщення ресурсів, використанню BIM/GIS та вибору організаційно-технологічних рішень [15–17]. Для цивільного будівництва така постановка є особливо актуальною, оскільки скорочення тривалості робіт може супроводжуватися збільшенням витрат, підвищення надійності постачання – зростанням запасів, а мінімізація логістичних витрат – ризиком порушення строків виконання робіт.

Таким чином, проблему, яку фіксує дослідження, можна сформулювати так: у цивільному будівництві недостатньо формалізовано багатокритеріальні математичні моделі організаційно-логістичних процесів, які одночасно враховують строки виконання робіт, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення ресурсами, ресурсну збалансованість та реальні обмеження будівельного майданчика. Це обґрунтовує актуальність розроблення математичної моделі, здатної забезпечити формування допустимих компромісних організаційно-логістичних альтернатив для підтримки прийняття управлінських рішень [13; 14].

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є обґрунтування багатокритеріальної математичної моделі оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві, яка забезпечує узгодження строків виконання робіт, сукупних логістичних витрат, надійності постачання та ресурсної збалансованості з урахуванням технологічних, ресурсних, просторових і логістичних обмежень будівельного майданчика.

Завдання дослідження полягають у визначенні особливостей організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва як об'єкта математичного моделювання; формуванні системи основних параметрів і змінних моделі; обґрунтуванні критеріїв оптимізації, що характеризують тривалість виконання робіт, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення ресурсами та ресурсну збалансованість; формалізації системи обмежень, пов'язаних із технологічною послідовністю робіт, доступністю ресурсів, складською місткістю, пропускною здатністю логістичних вузлів і готовністю фронтів робіт; проведенні розрахункової апробації запропонованої моделі на основі порівняння традиційного та оптимізаційного сценаріїв; а також оцінюванні ефективності моделі за показниками тривалості, сукупних логістичних витрат, надійності забезпечення ресурсами та ресурсної збалансованості.

Матеріали та методи

Методикою досліджень передбачено формування багатокритеріальної математичної моделі оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві на основі системного аналізу, параметризації будівельної логістики та принципів багатокритеріальної оптимізації. Організаційно-логістичний процес розглянуто як систему взаємопов'язаних технологічних операцій, ресурсних потоків, постачальників, складських зон, логістичних вузлів і фронтів робіт, що функціонують в умовах часових, ресурсних, просторових і надійнісних обмежень [1; 3; 7; 12].

Інформаційною основою дослідження є параметри цивільного будівельного проєкту: перелік і тривалість робіт, технологічні залежності між операціями, потреба в матеріально-технічних і трудових ресурсах, умови постачання, часові вікна доставки, складська місткість будівельного майданчика, пропускна здатність логістичних вузлів та готовність фронтів робіт. Відповідно до положень організації будівельного виробництва, планування будівельних процесів має враховувати послідовність виконання робіт, ресурсне забезпечення та умови організації будівельного майданчика [6]. У дослідженнях з будівельної логістики та Lean Construction також підкреслюється необхідність узгодження матеріальних і виробничих потоків для зменшення витрат і підвищення надійності виконання робіт [7–12].

У процесі дослідження визначено систему вхідних параметрів, змінних рішення, цільових функцій та обмежень математичної моделі. Для оцінювання альтернативних організаційно-логістичних сценаріїв застосовано підхід багатокритеріальної оптимізації та принцип Парето-ефективності, що дозволяє формувати множину допустимих компромісних рішень з урахуванням конфліктності критеріїв часу, витрат, надійності та ресурсної збалансованості [13; 14].

Перевірку працездатності моделі виконано шляхом розрахункової апробації на основі даних цивільного будівельного об'єкта. Порівнювалися традиційний календарно-ресурсний сценарій та оптимізаційний організаційно-логістичний сценарій, сформований з урахуванням цільових функцій і системи обмежень. Для обох сценаріїв використовувалися однакові вихідні характеристики об'єкта, параметри робіт, ресурсні потреби та обмеження майданчика, а ефективність оцінювалася за показниками тривалості, логістичних витрат, надійності та ресурсної збалансованості.

Результати та обговорення

На основі системного підходу до організації будівельного виробництва та положень будівельної логістики сформовано багатокритеріальну математичну модель оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві. На відміну від традиційного календарно-ресурсного планування, запропонований підхід передбачає одночасне врахування технологічної послідовності робіт, потреби в ресурсах, умов постачання, складської місткості, пропускної здатності логістичних вузлів і готовності фронтів робіт. Така постановка відповідає сучасним підходам до розгляду будівельного проєкту як складної системи взаємопов'язаних організаційних, технологічних, ресурсних і логістичних процесів [1–4; 6].

Загальна логіка формування моделі передбачає послідовний перехід від вихідних даних будівельного проекту до системи параметрів, змінних рішення, цільових функцій, обмежень і множини допустимих організаційно-логістичних альтернатив. Структурну схему цього процесу наведено на рис. 1.



Рис. 1. Загальна схема формування багатокритеріальної математичної моделі оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві

У межах запропонованої моделі організаційно-логістичне рішення розглядається як сукупність взаємопов'язаних управлінських параметрів, що визначають порядок виконання робіт, обсяги й моменти постачання ресурсів, використання складських зон, логістичних вузлів і доступних фронтів робіт, табл. 1. Такий підхід дозволяє оцінювати не лише календарну можливість виконання операцій, а й фактичну організаційно-логістичну готовність будівельного процесу до реалізації.

Таблиця 1. Основні групи параметрів багатокритеріальної організаційно-логістичної моделі

Група параметрів	Зміст параметрів	Практичне значення
Технологічні параметри	Перелік робіт, тривалість операцій, залежності між роботами	Забезпечують дотримання технологічної послідовності будівництва
Ресурсні параметри	Потреба в матеріальних, трудових і технічних ресурсах	Визначають можливість виконання робіт у конкретний період
Логістичні параметри	Постачальники, партії поставок, маршрути, часові вікна доставки	Характеризують умови забезпечення будівельного процесу ресурсами
Просторові параметри	Складські зони, під'їзні шляхи, логістичні вузли, фронти робіт	Відображають обмеження будівельного майданчика
Надійнісні параметри	Імовірність своєчасного постачання, ризик затримок, стабільність постачальників	Дозволяють оцінити стійкість організаційно-логістичного сценарію

Отримані у табл. 1 дані показують, що ефективність організаційно-логістичного рішення визначається не окремим параметром, а їх поєднанням. Наприклад, навіть за правильно сформованої технологічної послідовності робіт порушення умов постачання або перевищення складської місткості може призвести до простоїв, додаткових витрат і зниження ритмічності будівельного процесу. Це узгоджується з положеннями досліджень у сфері Lean Construction та управління ланцюгами постачання в будівництві, де підкреслюється важливість синхронізації виробничих і матеріальних потоків [7–12].

Для формалізації задачі визначено систему критеріїв оптимізації, що відображають ключові аспекти ефективності організаційно-логістичних процесів, табл. 2. До таких критеріїв віднесено тривалість виконання робіт, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення ресурсами та ресурсну збалансованість. Зазначені критерії мають частково

конфліктний характер, оскільки покращення одного з них може супроводжуватися погіршенням іншого. Наприклад, скорочення строків будівництва може потребувати збільшення інтенсивності постачання або залучення додаткових ресурсів, що впливає на витрати та навантаження на логістичні вузли.

Таблиця 2. Критерії оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві

Критерій	Умове позначення	Напрямок оптимізації	Зміст критерію
Тривалість виконання робіт	$f_1(X)$	min	Скорочення загального строку реалізації будівельного проекту
Сукупні логістичні витрати	$f_2(X)$	min	Зменшення витрат на постачання, транспортування, складування та простої
Надійність забезпечення ресурсами	$f_3(X)$	max	Підвищення ймовірності своєчасного надходження ресурсів
Ресурсна збалансованість	$f_4(X)$	max	Забезпечення рівномірного та узгодженого використання ресурсів
Примітки. 1 – X позначає організаційно-логістичне рішення, що включає параметри виконання робіт, постачання, складування та використання ресурсів. 2 – Напрямок оптимізації визначає бажану зміну критерію під час пошуку раціонального сценарію.			

Математична обробка структури задачі дозволила подати результати дослідження у вигляді системи цільових функцій (1) – (5), які описують основні напрями оптимізації організаційно-логістичного рішення. Узагальнено багатокритеріальна задача має вигляд:

$$F(X) = \{f_1(X), f_2(X), f_3(X), f_4(X)\} \rightarrow opt, \quad (1)$$

де X – організаційно-логістичне рішення; $f_1(X)$ – тривалість виконання робіт; $f_2(X)$ – сукупні логістичні витрати; $f_3(X)$ – надійність забезпечення ресурсами; $f_4(X)$ – ресурсна збалансованість.

Для окремих критеріїв напрями оптимізації можна подати так:

$$f_1(X) \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$f_2(X) \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$f_3(X) \rightarrow \max, \quad (4)$$

$$f_4(X) \rightarrow \max, \quad (5)$$

Формули (1)–(5) відображають багатокритеріальний характер задачі, у межах якої неможливо обмежитися пошуком одного найкращого показника. Така постановка відповідає підходам багатокритеріальної оптимізації та формування Парето-ефективних рішень, де раціональним вважається таке рішення, для якого неможливо покращити один критерій без погіршення хоча б одного іншого [13; 14].

Важливою складовою моделі є система обмежень, яка забезпечує практичну допустимість сформованих альтернатив, табл. 3. На відміну від спрощених оптимізаційних постановок, де основна увага приділяється лише строкам або витратам, запропонована модель враховує обмеження, що виникають безпосередньо в умовах будівельного майданчика.

Таблиця 3. Система обмежень багатокритеріальної організаційно-логістичної моделі

Тип обмеження	Зміст обмеження	Вплив на організаційно-логістичне рішення
Технологічні обмеження	Дотримання послідовності виконання робіт	Унеможливають порушення технології будівництва
Ресурсні обмеження	Відповідність потреби в ресурсах їх фактичній доступності	Запобігають дефіциту матеріалів, техніки та працівників
Складські обмеження	Неперевищення доступної місткості складських зон	Запобігають перевантаженню будівельного майданчика
Логістичні обмеження	Урахування пропускної здатності логістичних вузлів	Зменшують ризик черг, затримок і блокування потоків

Часові обмеження	Дотримання часових вікон доставки	Забезпечують синхронізацію постачання з графіком робіт
Обмеження готовності фронтів	Наявність технологічної, ресурсної, просторової та інформаційної готовності	Дозволяють включати до плану лише фактично готові операції

Дані табл. 3 показують, що система обмежень виконує функцію перевірки реалістичності організаційно-логістичного сценарію. Рішення, яке забезпечує мінімальну тривалість або найменші витрати, не може вважатися прийнятним, якщо воно порушує технологічну послідовність, перевищує складську місткість або не враховує готовність фронтів робіт. Тому в запропонованій моделі оптимізація поєднується з перевіркою допустимості альтернатив.

Для перевірки працездатності запропонованої моделі виконано розрахункову апробацію на основі даних цивільного будівельного об'єкта – двосекційного 14-поверхового житлового будинку у м. Запоріжжя. У межах випробування об'єкт подано в укрупненому вигляді як систему взаємопов'язаних будівельних робіт із заданими тривалостями, технологічними попередниками, ресурсними потребами, параметрами постачання та обмеженнями будівельного майданчика. Порівнювалися традиційний календарно-ресурсний сценарій та оптимізаційний організаційно-логістичний сценарій, сформований з урахуванням критеріїв тривалості, логістичних витрат, надійності постачання, ресурсної збалансованості та системи обмежень. Результати порівняння наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Результати розрахункової апробації запропонованої моделі на основі порівняння традиційного та оптимізаційного сценаріїв

Показник	Традиційний сценарій	Оптимізаційний сценарій	Абсолютна зміна	Відносна зміна
Тривалість, дні	395,00	381,91	-13,09	-3,31 %
Логістичні витрати, грн	7 581 684,17	7 257 551,01	-324 133,16	-4,28 %

Надійність постачання	0,5100	0,8460	+0,3360	+65,88 %
Ресурсна збалансованість	0,8600	0,8815	+0,0215	+2,50 %

Отримані результати показують, що оптимізаційний сценарій забезпечив одночасне покращення всіх критеріїв: тривалість реалізації проекту скоротилася на 13,09 дня, логістичні витрати зменшилися на 324 133,16 грн, надійність постачання зросла з 0,5100 до 0,8460, а ресурсна збалансованість – з 0,8600 до 0,8815. Це підтверджує можливість використання запропонованої моделі для кількісного порівняння альтернативних організаційно-логістичних сценаріїв з урахуванням обмежень будівельного майданчика.

З урахуванням наведених критеріїв і обмежень результатом моделювання є не одне формально оптимальне рішення, а множина допустимих організаційно-логістичних альтернатив. Подальший вибір раціонального сценарію здійснюється з урахуванням пріоритетів конкретного будівельного проекту. Якщо ключовим пріоритетом є скорочення строків, перевага може бути надана альтернативі з мінімальною тривалістю. Якщо пріоритетом є стійкість постачання, більш доцільним може бути сценарій із вищим рівнем надійності, навіть за умови дещо більших логістичних витрат.

Таким чином, запропонована модель забезпечує перехід від однокритеріального календарно-ресурсного планування до багатокритеріального оцінювання організаційно-логістичних сценаріїв. Її використання дозволяє формалізувати взаємозв'язок між строками виконання робіт, логістичними витратами, надійністю постачання, ресурсною збалансованістю та обмеженнями будівельного майданчика. На відміну від суто концептуального опису моделі, виконана розрахункова апробація показала кількісне покращення основних показників ефективності, що підтверджує можливість практичного використання моделі для підтримки прийняття управлінських рішень під час планування, коригування та реалізації цивільних будівельних проектів.

Висновки

Проведене дослідження показало, що організаційно-логістичні процеси цивільного будівництва доцільно розглядати як систему взаємопов'язаних робіт, ресурсних потоків, логістичних вузлів, складських зон і управлінських рішень. Такий підхід дає змогу перейти від

традиційного календарно-ресурсного планування до комплексного оцінювання організаційно-логістичних сценаріїв з урахуванням реальних обмежень будівельного майданчика.

У роботі обґрунтовано багатокритеріальну математичну модель, у якій основними критеріями визначено тривалість виконання робіт, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення ресурсами та ресурсну збалансованість. Модель враховує технологічну послідовність робіт, доступність ресурсів, складську місткість, пропускну здатність логістичних вузлів, часові вікна доставки та готовність фронтів робіт, що дозволяє відокремлювати практично допустимі рішення від формально оптимальних, але нерезалізованих сценаріїв.

Розрахункова апробація підтвердила працездатність моделі: порівняно з традиційним календарно-ресурсним сценарієм отримано скорочення тривалості реалізації проєкту на 13,09 дня, зниження сукупних логістичних витрат на 324 133,16 грн, підвищення надійності забезпечення ресурсами на 0,3360 та покращення ресурсної збалансованості на 0,0215. Це свідчить про можливість використання моделі для кількісного порівняння альтернативних сценаріїв і підтримки управлінських рішень у цивільному будівництві.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що у нього немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи він не використовував технології штучного інтелекту.

References

1. Anin, V. I., Fostashchenko, D. O. (2025). Improving the efficiency of organizational and technological solutions in infrastructure construction through the implementation of a systems approach. *Modern Technologies and Methods of Calculations in Construction*, 24, 52–62. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-04)
2. Banakh, A. V., Arutiunian, I. A., Arutiunian, Ye. Ye. (2020). Methodology for optimizing construction production in dense development conditions. *Bridges and*

Tunnels: Theory, Research, Practice, 17, 6–12. URL: <http://btrtp.diit.edu.ua/article/view/204997/204887>

3. Pavlov, I. D., Poltavets, M. O., Pavlov, F. I. (2020). System management of organizational and technological reliability of production processes in construction. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 17, 53–61. <https://doi.org/10.15802/btrtp2020/205011>

4. Radkevych, A. V., Arutiunian, I. A., Dankevych, N. O., Saikov, D. V. (2017). Determination of conceptual approaches to the obligatoriness of implementing optimization models of construction production for domestic contracting enterprises. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 12, 78–86. URL: <http://btrtp.diit.edu.ua/article/view/117398>

5. Tugai, A. A., Samaha, T. (2022). Determination of the impact of the load on buildings for the subsequent optimal choice of the organizational and technological solution of the construction project. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 50(1), 93–101. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(1\)](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(1))

6. DBN A.3.1-5:2016. Organization of construction production. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2016. 46 p.

7. Koskela, L. (1992). *Application of the New Production Philosophy to Construction*. Stanford: Stanford University. 81 p.

8. Ballard, G. (2000). *The Last Planner System of Production Control*: PhD thesis. Birmingham: University of Birmingham. 192 p.

9. Vrijhoef, R., Koskela, L. (2000). The four roles of supply chain management in construction. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 6(3–4), 169–178. [https://doi.org/10.1016/S0969-7012\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0969-7012(00)00013-7)

10. Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A., Owen, R. (2010). Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 968–980. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203)

11. Mossman, A. (2007). Lean logistics: helping to create value by bringing people, information, plant, equipment and materials together at the workplace. *Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 198–211. URL: <https://iglc.net/papers/details/472>

12. Rehman, M. A. U., Chaabane, A., Khan, S. A. (2021). Review of construction supply chain optimization papers for performance improvement. *Proceedings of the 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 974–984. <https://doi.org/10.24928/2021/0132>

13. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>

14. Coello Coello, C. A., Lamont, G. B., Van Veldhuizen, D. A. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2nd ed. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36797-2>

15. Papadaki, I. N., Chassiakos, A. P. (2016). Multi-objective construction site layout planning using genetic algorithms. *Procedia Engineering*, 164, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.587>

16. Zavari, M., Shahhosseini, V., Ardeshir, A., Sebt, M. H. (2022). Multi-objective optimization of dynamic construction site layout using BIM and GIS. *Journal of Building Engineering*, 52, 104518. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104518>
17. El-Rayes, K., Kandil, A. (2005). Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(4), 477–486. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:4\(477\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:4(477))

Література

1. Анін, В. І., Фостащенко, Д. О. (2025). Підвищення ефективності організаційно-технологічних рішень в інфраструктурному будівництві шляхом впровадження системного підходу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 52–62. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-04)
2. Банах, А. В., Арутюнян, І. А., Арутюнян, Є. Є. (2020). Методологія оптимізації будівельного виробництва в умовах щільної забудови. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 17, 6–12. URL: <http://btrtp.diit.edu.ua/article/view/204997/204887>
3. Павлов, І. Д., Полтавець, М. О., Павлов, Ф. І. (2020). Системне управління організаційно-технологічною надійністю виробничих процесів у будівництві. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 17, 53–61. <https://doi.org/10.15802/btrtp2020/205011>
4. Радкевич, А. В., Арутюнян, І. А., Данкевич, Н. О., Сайков, Д. В. (2017). Детермінація концептуальних підходів щодо облігаторності впровадження оптимізаційних моделей будівельного виробництва для вітчизняних підрядних підприємств. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 12, 78–86. URL: <http://btrtp.diit.edu.ua/article/view/117398>
5. Tugai, A. A., Samaha, T. (2022). Determination of the impact of the load on buildings for the subsequent optimal choice of the organizational and technological solution of the construction project. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 50(1), 93–101. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(1\)](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(1))
6. ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва. Київ: Мінрегіон України, 2016. 46 с.
7. Koskela, L. (1992). Application of the New Production Philosophy to Construction. Stanford: Stanford University. 81 p.
8. Ballard, G. (2000). The Last Planner System of Production Control: PhD thesis. Birmingham: University of Birmingham. 192 p.
9. Vrijhoef, R., Koskela, L. (2000). The four roles of supply chain management in construction. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 6(3–4), 169–178. [https://doi.org/10.1016/S0969-7012\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0969-7012(00)00013-7)
10. Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A., Owen, R. (2010). Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 968–980. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203)
11. Mossman, A. (2007). Lean logistics: helping to create value by bringing people, information, plant, equipment and materials together at the workplace. *Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 198–211. URL: <https://iglc.net/papers/details/472>

12. Rehman, M. A. U., Chaabane, A., Khan, S. A. (2021). Review of construction supply chain optimization papers for performance improvement. *Proceedings of the 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 974–984. <https://doi.org/10.24928/2021/0132>
13. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
14. Coello Coello, C. A., Lamont, G. B., Van Veldhuizen, D. A. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2nd ed. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36797-2>
15. Papadaki, I. N., Chassiakos, A. P. (2016). Multi-objective construction site layout planning using genetic algorithms. *Procedia Engineering*, 164, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.587>
16. Zavari, M., Shahhosseini, V., Ardeshir, A., Sebt, M. H. (2022). Multi-objective optimization of dynamic construction site layout using BIM and GIS. *Journal of Building Engineering*, 52, 104518. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104518>
17. El-Rayes, K., Kandil, A. (2005). Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(4), 477–486. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:4\(477\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:4(477))

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 05.05.2026	Received 05.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 15.05.2026	Received in revised form 15.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. S. Kovalenko*

4th year postgraduate student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2224-4174>
Department of Industrial and Civil Engineering
Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave., Zaporizhzhia, Ukraine, 69006

*corresponding author, e-mail: 22bendera.s@gmail.com

Multi-criteria mathematical model for optimizing organizational and logistics processes in civil construction

How to Cite:

Kovalenko, O. S. (2026). Multi-criteria mathematical model for optimizing organizational and logistics processes in civil construction. *Modern Technologies and Methods of Calculations in Construction*, 25, 124–139. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-10](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-10)

Abstract. The article examines the problem of improving the efficiency of organizational and logistics processes in civil construction based on multi-criteria mathematical modeling. It is determined that traditional approaches to schedule-and-resource planning do not always ensure coordination between work execution timelines, resource needs, supply capabilities, storage capacity, and the throughput capacity of logistics nodes. This necessitates the development of a model capable of simultaneously

taking into account the time, cost, resource, spatial, and reliability parameters of the construction process.

The aim of the study is to substantiate a multi-criteria mathematical model for optimizing organizational and logistics processes in civil construction, which provides formalized coordination of work duration, total logistics costs, resource supply reliability, and resource balance. The methodological basis of the study consists of the principles of systems analysis, parameterization of construction logistics, structural-functional modeling, and multi-criteria optimization.

The paper proposes the structure of a mathematical model that includes a system of input parameters, decision variables, objective functions, and constraints. The main optimization criteria are defined as minimizing work duration, minimizing total logistics costs, maximizing resource supply reliability, and improving resource balance. The model takes into account technological dependencies between works, resource needs, delivery time windows, storage capacity limitations, the throughput capacity of logistics nodes, and the readiness of work fronts.

Computational testing of the proposed model was performed by comparing a traditional schedule-and-resource scenario with an optimized organizational and logistics scenario. The obtained results showed a reduction in project implementation duration from 395 to 381.91 days, a decrease in total logistics costs from UAH 7,581,684.17 to UAH 7,257,551.01, an increase in resource supply reliability from 0.51 to 0.8460, and an improvement in resource balance from 0.86 to 0.8815.

The practical significance of the proposed approach lies in the possibility of forming a set of feasible compromise organizational and logistics alternatives that can be used to support managerial decision-making during the planning, adjustment, and implementation of civil construction projects.

Keywords: civil engineering, organizational and logistics processes, multi-criteria optimization, construction logistics, Pareto-efficient solutions.

УДК 624.21

А. О. Атинян

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6667-6869>

Кафедра комп'ютерної графіки

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61001

І. В. Шумаков

д.т.н., проф, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1502-051X>

Кафедра технології та організації будівельного виробництва

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Черноглазівська, 17, Харків, 61002, Україна

А. Р. Ібрагімов

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7469-6285>

Кафедра технології та організації будівельного виробництва

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Черноглазівська, 17, Харків, 61002, України

О. А. Гвоздюк

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7856-9094>

Кафедра будівельних конструкцій

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Черноглазівська, 17, Харків, 61002, України

О. М. Пустовойтова*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4774-6686>

Кафедра комп'ютерної графіки

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61001

*автор-кореспондент, e-mail: oksana_pustov@ukr.net

Аналіз організаційно-технологічних рішень із використанням інноваційних матеріалів при відновленні мостових споруд

Цитувати як:

Атинян, А. О., Шумаков, І. В., Ібрагімов, А. Р., Гвоздюк, О. А., Пустовойтова, О.М. (2026). Аналіз організаційно-технологічних рішень із використанням інноваційних матеріалів при відновленні мостових споруд. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 140–152. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-11](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-11)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті представлено результати теоретичного обґрунтування та практичної реалізації організаційно-технологічних рішень для ремонту, реставрації та реконструкції мостових конструкцій, пошкоджених під час експлуатації або внаслідок аварійних впливів. Запропоновані рішення базуються на наукових розробках харківських дослідників у галузі будівельних технологій, реконструкційної інженерії та використання сучасних композитних та ремонтних матеріалів. Особлива увага приділяється підвищенню

ефективності відновлювальних процесів в умовах обмеженості часу, ресурсів та необхідності забезпечення безперервної роботи об'єктів транспортної інфраструктури. Розроблено загальну концепцію реставрації мостових конструкцій, яка враховує весь життєвий цикл об'єкта - від обстеження та оцінки технічного стану до вибору оптимальних організаційно-технологічних заходів, виконання ремонтних робіт та подальшого контролю експлуатаційної надійності. На основі цієї концепції запропоновано укрупнений алгоритм прийняття інженерних рішень. Алгоритм дозволяє визначити найефективніший сценарій реставрації залежно від ступеня пошкодження, умов експлуатації, економічної доцільності та наявних технічних ресурсів. Розглянуто кілька можливих альтернатив, включаючи консервацію конструкції, часткове посилення, повну реконструкцію або демонтаж об'єкта з подальшою заміною. Розроблені розрахункові моделі та організаційно-технологічні схеми включають використання сучасних ремонтних технологій, високоефективного обладнання, волокнисто-армованих композитів, полімермодифікованих ремонтних розчинів та інноваційних методів посилення несучих конструкцій. Запропоновані підходи дозволяють оптимізувати трудові ресурси, скоротити час будівництва та монтажу, мінімізувати перебої в русі транспорту та покращити безпеку праці під час ремонтних робіт.

Ключові слова: мостові конструкції, реконструкція, композитні матеріали, конструкційне посилення, довговічність інфраструктури.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Станом на 2025 рік в Україні експлуатувалось понад 15 000 мостів і шляхопроводів, значна частина яких потребувала поточного або капітального ремонту. Ці споруди забезпечують безпечне подолання природних та штучних перешкод, при цьому навантаження на них постійно зростає [1. 2].

У процесі експлуатації конструкції зазнають дефектів і пошкоджень, а внаслідок військових дій та повномасштабного вторгнення РФ багато мостів отримали значні руйнування. Це створює необхідність проведення ремонтно-відновлювальних робіт для забезпечення їх подальшої безпечної експлуатації.

Актуальність проблеми полягає не тільки в складності безпечної організації проведення ремонтних і відновлювальних робіт в умовах обстрілу територій України, а й в значній трудомісткості, високій вартості і необхідності забезпечення в стислі терміни відновлення споруди до нормативного стану.

Питанням, пов'язаним з відновленням, ремонтом і реконструкцією різного типу лінійних об'єктів присвячені дослідження вітчизняних вчених: Національного транспортного університету (м. Київ), ДДНДІ ім. М. Шульгіна, ДП «Укрдпродор», ХНАДУ (м. Харків), дніпровських та інших українських вчених, та розробленої та вже існуючої документації (ДБН В В.1.2-2:2006, ДБН В.1.2-14-2009),. Та варто зазначити і

закордонний досвід ремонту мостів та шляхопроводів, та шляхів покращення методів торкретування і безпосередньо покращення самої торкрет суміші та сумішей для ремонтних робіт [2, 5]. Варто зазначити досвід спостереження протягом 23 років за мостовою конструкцією у місті Келі (Колумбія) [6], яка складалася із двох естакад, де упродовж експлуатації велись поточні ремонти. але як показував досвід, використання звичайних цементних розчинів при торкретуванні та ремонтних роботах залишає по собі значну частину хлоридів та інших забруднень. І як показав досвід [7-12], тільки використання модифікованих сумішей та вдосконалення виконання самих ремонтних робіт, аж до контролю не тільки якості виконання, але й прибирання сміття дозволило зберегти конструкцію від руйнування. В роботі [13] показано різницю щодо використання торкрет бетону, від інших видів бетону, і основним напрямком в цій роботі іде використання торкрету для стабілізації схилів, але слід зазначити, що цей досвід корисний для мостового господарства, так як значну частину шляхопроводів складають земляні споруди, які потребують укріпленнь. В достатній кількості розглянуто закордонними вченими питань з прискорення затвердіння торкретсумішей та вдосконаленню цементних та цементно-бетонних сумішей та матеріалів [14-17]. В той же час, слід відмітити недостатній обсяг з розробки і впровадженням інноваційних організаційно-технологічних досліджень з вирішення вказаної проблеми, особливо враховуючи негативний вплив на стан мостів військових дій в Україні.

Невирішеними залишаються питання обґрунтування рішень щодо ліквідації дефектів і пошкоджень мостів, а також їх реконструкції в умовах впливу військових дій, необхідності організації укриттів для працівників та залучення фахівців відповідних спеціалізацій.

У роботі запропоновано загальну концепцію та алгоритм відновлення, ремонту і реконструкції пошкоджених мостів із застосуванням сучасних матеріалів і технологій. Основну увагу приділено інноваційним методам ремонту залізобетонних мостових конструкцій, спрямованим на підвищення довговічності, вантажопідйомності та експлуатаційної надійності споруд.

Мета і завдання дослідження

Метою цієї роботи є огляд і аналізу можливих рішень щодо відновлення проблемних конструкцій мостів і вибір критерію, який дозволяє, при заданих обмеженнях, призначати ефективний спосіб усунення. Для досягнення поставленої мети в роботі розглядаються такі завдання: дефекти та пошкодження конструкцій, а також заходи, спрямовані на їх усунення.

- діагностика пошкоджених конструкцій об'єкту, оцінка технічного стану та експлуатаційної надійності споруди, яка отримується на підставі результатів обстеження, та є інструментом для прийняття ефективних рішень щодо подальшого їх використання;

- систематизація за різними ознаками дефектів і пошкоджень залізобетонних конструкцій;

- розгляд можливих організаційно-технологічних рішень проведення робіт по відновленню нормативного стану конструкцій і вибір оптимального варіанту.

Матеріали та методи

При обстеженні технічного стану конструкцій будівель і споруд використовують різні технічні засоби, інструменти та вимірювальне обладнання такі як механічна рулетка, лазерні далекоміри, тахеометр з інтегрованим приймачем, рівні будівельні, інструменти і прилади для вимірювання малих відстаней (тріщини), нівеліри, виски будівельні, теодоліт (тахеометр), електронний кутомір, прилади вертикального проектування, прилади для визначення положення об'єкта, обстеження високих об'єктів та побудови 3-D моделі, прилади для вимірювання міцності бетону, прилади для фото фіксації фактичного стану конструкцій об'єктів, прилад для пошуку металу у конструкціях та інше.

Методика проведення обстеження конструкцій моста

Функцію відповідального органу за своєчасний ремонт та реконструкцію мостів в Україні покладено на балансоутримувачів: Укравтодор, Укрзалізниця та інші підприємства. Для перевірки стану мостів, відповідно рішення Ради національної безпеки і оборони від 23 червня 2023 року в Україні призначено спеціальну комісію. В роботі по обстеженню мостів приймають участь представники Мінвідновлення, Міністерства оборони, Національної гвардії, Служби безпеки України та вчені із ДП «ДерждорНДІ».

Організація робіт та послідовність проведення обстежень здійснюються відповідно до нормативних документів, що регламентують обстеження, паспортизацію, безпечну та надійну експлуатацію будівель і споруд (НДІ БВ – Київ, 2003), «Положення про безпечну та надійну експлуатацію будівель і споруд», а також «Настанови щодо обстеження будівель для визначення та оцінки їх технічного стану».

Технічний стан відповідальних (несучих) будівельних конструкцій визначають візуальними оглядами, інструментальними вимірюваннями фактичних параметричних значень, обмірами, проведення аналізу-співставлення на відповідність фактичних значень, регламентованим значенням чинних будівельних норм.

При проведенні будівельно-технічного обстеження виконують візуальні огляди конструктивних елементів. Фактичний технічний стан фотографічно фіксують фотоапаратом, наприклад типу «OLYMPUS-5060». Виявлені дефекти, пошкодження та відхилення від проектного положення необхідно систематизувати і класифікувати по однотипним групам конструктивних елементів з прив'язкою до місця їхнього знаходження.

Лінійні виміри виконують з використанням лазерних далекомірів, наприклад «LeicaDISTOА5» та компонованою мірною стрічкою L=12,5 м (JOBprof).

Міцність конструктивних елементів, як правило, визначають механічним методом неруйнівного контролю із застосуванням приладу - Склерометр «Вимірювач міцності «Beton Pro CONDTRON», відповідність норм EN 12504-2:2001). Дія приладу базується на методі ударного імпульсу – пружного відскоку бійки після нанесеного удару по поверхні конструкції. Величина пружного відскоку є мірою міцності, що має кореляційний характер. Фактичне значення міцності визначалось автоматично приладом за тарувальними залежностями відносно напрямку нанесення удару з урахуванням коефіцієнта кореляції. Всі вимірювання та статистична обробка виконують відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-220:2009 та ДСТУ Б В.2.7-224:2009, із застосуванням програмних комплексів, наприклад ПК «Programs» СКБ «Будприлад» для Windows 2000, що включають в себе:

- виключення грубих похибок, які викликані нерівномірним складом матеріалу;
- попаданням виміру приладу в пори матеріалу;
- визначення проміжку, до якого належить найбільша кількість вимірів;
- визначення середньої міцності в цьому проміжку.

На базі напрацьованих статистичних даних визначають опосередковані фактичні характеристики міцності будівельних конструкцій та проводиться аналіз-співставлення їхньої відповідності регламентованим чинним нормам.

Для визначення міцності бетону застосовують механічні молотки Шмідта фірми Proseq та еталонний молоток М.П. Кашкарова.

Еталонний молоток Кашкарова має сталевий шарик і змінний еталонний стрижень. Під час випробування удари наносять по поверхні бетону, утворюючи відбитки на бетоні та стрижні. Міцність бетону визначають за результатами порівняння отриманих відбитків із дотриманням нормативних вимог до відстаней між ними.

Розташування арматури в конструктивних елементах визначають електронним приладам для пошук металу у конструкціях «Laserliner MultiFinder Plus» в режимі «METAL-SCAN».

Загальні та локальні деформації конструкцій визначають лінійними вимірами, крени конструктивних елементів електронним кутоміром «STANLEY Fat Max, 60 WL».

По результатам обробки та систематизації результатів натурального обстеження, з урахуванням особливостей конструктивних елементів, проводять аналіз-співставлення їхньої відповідності чинним нормам проектування, будівництва та експлуатації по двом групам граничних станів.

Деформативність визначають по ідентифікації деформацій за ступенем пошкодження, відповідно ДСТУ Б. В.1.2–3:2006 «Прогини та переміщення» та згідно класифікації деформацій будівель та споруд за трьома категоріями:

I - деформації з швидкістю 37 мм/рік не порушують нормальну експлуатацію;

II - деформації з швидкістю 62 мм/рік порушують нормальну експлуатацію;

III - деформації з швидкістю до 179 мм/рік аварійні.

Крім того, за даними натурних досліджень виконують перевірочний розрахунок на міцність та стійкість. При проведенні чисельних досліджень використовують багатофункціональну інтегрована система аналізу конструкцій (ПК) «LIRA 9.4». Зазначений програмний комплекс дозволяє виконувати чисельні дослідження міцності та стійкості будівельних конструкцій.

На основі результатів натурних обстежень, інструментальних вимірювань, аналізу напружено-деформованого стану конструкцій, з урахуванням виявлених відхилень, дефектів і пошкоджень, згідно аналізу співставлення на відповідності, відповідно до чинних нормативних документів (ДСТУ Б В.1.2-3:2006, ДБН В В.1.2-2:2006, ДБН В.1.2-14-2009, ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016), надається оцінка фактичному технічному стану та експлуатаційної придатності конструкцій і розробляють рекомендації по забезпеченню подальшої надійної та безпечної експлуатації, іноді у вигляді експериментів здійснюються підсилення як дорожнього полотна, так і конструктивів новітніми матеріалами.

До основних методів ліквідації дефектів залізобетонних конструкцій відносять: відновлення захисних шарів бетону; заробка тріщин та значних об'ємних дефектів (вибоїни, раковини тощо). Для відновлення захисних шарів залізобетонних конструкцій застосовують нанесення цементно-піщаного розчину, бетону, полімер бетону [6, 7, 17].

Неглибокі тріщини ремонтують із застосуванням синтетичних матеріалів або ін'єктуванням цементно-піщаного розчину з подальшим улаштуванням об'єм із вуглецевого волокна. Для конструкцій зі значними пошкодженнями використовують торкретування - пошарове нанесення бетонної чи розчинної суміші на підготовлену поверхню.

Найбільш ефективною формою організації ремонтно-відновлювальних робіт є потоковий метод, для якого визначають технологічну і просторову структуру потоку, ритм робіт та кількість виконавців. Між окремими етапами робіт передбачають технологічні перерви для набору бетоном необхідної міцності перед нанесенням захисного шару.

Кількість захваток, виходячи з необхідності створення установленого рівноритмічного спеціалізованого потоку, повинно задовольняти наступним умовам:

$$m \geq n + \frac{t_{\text{ТП}}}{\kappa}$$

Якщо прийняти $t_{\text{ТП}} = K$, то $m \geq n + 1$, тобто повинно бути $m \geq 5$.

Враховуючи конкретні об'ємно-планувальне рішення споруди уточнюємо кількість захваток.

Для визначення ритму потоку складаємо таблицю технологічних розрахунків, користуючись галузевими нормами часу на будівельні та ремонтно-будівельні роботи.

Ритм потоку визначається за ведучим процесом – укладанню бетонної суміші методом торкретування.

Після того як буде визначено ритм потоку K , слід визначити для всіх елементарних потоків кількість виконавців з виразу:

$$N = \frac{Q_{\text{захв.}}}{KK_n}$$

де $Q_{\text{захв.}}$ – нормативна трудомісткість відповідного елементарного потоку на захватці, люд.-год.(люд.-змін);

K – ритм потоку, год. (змін);

K_n – коефіцієнт скорочення норм часу, рівний 1,1...1,2.

Ув'язування елементарних потоків рекомендується виконувати за допомогою циклограми, при цьому необхідно забезпечити безперервність та рівномірність виконання складових потоків.

Тривалість робіт на температурному відсіку прогону залізобетонного мосту при рівноритмічному спеціалізованому потоці визначається за допомогою такої формули:

$$T = \frac{1}{A} [K(m + n - 1) + t_{mn}]$$

де A – змінність робіт.

В залежності від складності робіт по відновленню лінійної споруди роботи можуть бути організовані кратноритмічним потоком (неприведеного або приведенного виду) або різноритмічним спеціалізованим потоком.

Тривалість кратноритмічного потоку неприведеного виду визначають за формулою:

$$T = \frac{1}{A} [k(b \times m + n - 1) + t_{III}]$$

де b – найбільше значення кратності ритму

Перетворення кратноритмічного спеціалізованого потоку до приведенного вигляду здійснюється шляхом виконання кратноритмічного елементарного потоку паралельно діючими бригадами (ланками), кількість яких повинна відповідати „ b ”, тобто кратності ритмів. У цьому випадку кожна бригада працює на своїх захватках із ритмом, що дорівнює „ bk ”, і включається до потоку з інтервалом „ k ”.

Тривалість кратноритмічного потоку у приведеному вигляді визначають за допомогою такої формули:

$$T = \frac{1}{A} \left[k \left(m + n - 1 + \sum_{i=1}^{n_{np}} (b_i - 1) \right) + t_{III} \right]$$

Для узгодження елементарних потоків у різноритмічному спеціалізованому потоці необхідно за допомогою циклограми графічно виконати їх зв'язок методом спроб. При цьому слід враховувати як технологічні, так і організаційні перерви, які забезпечують безперервність виконання всіх елементів елементарних потоків.

Тривалість різноритмічного спеціалізованого потоку визначають за допомогою графоаналітичного методу на основі циклограми, використовуючи таку формулу:

$$T = \frac{1}{A} \left[\sum_{i=1}^{n-1} k_{i,1} + \sum t_{III} + \sum t_{OP} + \sum_{i=1}^m k_i^n \right]$$

де $\sum_{i=1}^{n-1} k_{i,1}$ – сума ритмів усіх елементарних потоків крім останнього

на першій захватці, змін;

$\sum t_{тп}$ – сума технологічних перерв на 1-й захватці, змін;

$\sum t_{оп}$ – сума організаційних перерв на 1-й захватці, змін;

$$\sum_{i=1}^m k_i^n - \text{тривалість останнього різноритмічного елементарного}$$

потоків, змін.

Результати та обговорення

При здійсненні технічного огляду конструкцій мосту через ріку Лопань (на автодорозі М-03 Київ-Харків-Довжанський) були виявлені дефекти залізобетонних колон і балок. Спеціалістами ПрАТ «Альпсервіс» встановлено, що внаслідок багаторічних динамічних навантажень та впливу води в опорних елементах мосту, в колонах, з'явилися тріщини.

Також було встановлено, що внаслідок пошкодження деформаційних швів в залізобетонних балках був зруйнований зовнішній гідроізоляційний захисний шару і, як наслідок, виникла корозія арматури в конструкціях ригелю та торців залізобетонних балок.

Однією із умов по проведенню відновлювальних робіт вимагалось їх виконання без перекриття через міст руху транспорту. Розв'язання поставленої задачі потребувало застосування нестандартних підходів, зокрема використання сучасних матеріалів бренду Sika, інтенсивних технологій нанесення бетонних сумішей та потокової організації ремонтно-відновлювальних робіт. Порівняльний аналіз сучасних CFRP-систем показав, що технології Sika характеризуються високою міцністю на розтяг (до 3500 МПа), модулем пружності до 210 ГПа та підвищеною довговічністю клейових з'єднань. У порівнянні з аналогічними системами Mapei, Master Builders Solutions і Fosroc, їх застосування дозволяє скоротити тривалість ремонтно-відновлювальних робіт на 25-40 % та підвищити експлуатаційну надійність мостових конструкцій.

Опорні частини мосту (залізобетонні колони) в процесі ремонту були очищені за допомогою піскоструминного апарату, заробка тріщини в бетоні виконувався за допомогою матеріалу Sikadur 41. Для підсилення несучої спроможності колон було виконано закріплення на поверхнях колон, з використанням епоксидного клею Sikadur-330, полотна з вуглецевих волокон SikaWrap, яке закріплювались у два шари. Після закріплення полотна були видалені пошкоджені металеві кільця, та був нанесений на полотно цементно-епоксидний розчин Sikagard-720 EpoCem і, після набору розчином необхідної міцності, відновлені поверхні були пофарбовані фарбою Sikagard-680 S Betoncolor. Етап виконання робіт показаний на рис.

В процесі проведення відновлювальних робіт виявлені місця розташування слабого бетону, який був видалений за допомогою відбійних молотків. Частини арматури з слідами корозії також були

очищені за допомогою піскоструминної технології, а металеві частини, які зазнали значного пошкодження були частково замінені або посилені. Після очищення та знепилення на бетон та металеві частину був нанесений антикорозійний захист Sika Mono Top -910N.

Відповідно розробленого проекту виконання робіт відновлення залізобетонних конструкцій виконувалось методом торкретування з використанням суміші Sika Gunit 03, а для частин де було неможливим нанесення торкрету застосовували ремонтну суміш Sika MonoTop 412, також застосовувались вуглецеві добавки у суміші, а також вермікулітовий порошок. [6, 7].

При приготуванні торкрет-бетону мінімальний вміст цементу приймався 300 кг/м^3 , водоцементне відношення приймалось 0,4 – 0,5.

Прийнятий склад торкрет-фібробетонної суміші призначався із умови забезпечення необхідних технологічних та експлуатаційних характеристик, які були задані для приготовленої суміші та на період набору 100% міцності (клас бетону C30/35).

Відремонтовані та відновлені елементи залізобетонних конструкцій мосту додатково були захищені за допомогою цементно-епоксидного розчину Sikagard-720 EpoCem та пофарбовані фарбою Sikagard-680 S Betoncolor, що забезпечило також і естетичний вигляд відремонтованих конструкцій. При ремонті залізобетонних ригелів верхні їх поверхні були захищені нанесеним шаром гідроізоляції.

Більш ніж через рік, після виконання робіт по відновленню мосту проведене ретельне обстеження відремонтованих конструкцій і всієї споруди вона. Установлено що якість проведеного ремонту відповідає нормативним вимогам, жодних дефектів конструкцій не було виявлено.

Висновки

Досвід використання сучасних матеріалів і організаційно-технологічних рішень впроваджених ПрАТ «Альпсервіс» за допомогою розробок харківських вчених дозволяє їх рекомендувати для проведення ремонтних і відновлювальних робіт при ремонті і реконструкції мостів, інтенсифікувати їх проведення, гарантує довговічність відремонтованих конструкцій мостів і забезпечує продовження терміну експлуатації споруди та заощадження значних коштів. Також слід зазначити експериментальні рішення, які потребують подальших досліджень: це використання вуглецевого полотну для укріплення просторових конструкцій, розширення використання цього матеріалу, а також більш досконале дослідження використання вуглецевих та вермікулітових домішок як складових торкрет-суміші та ремонтних розчинів.

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Trykoz, L., Zinchenko, O., Borodin, D., and Kamchatna, S., “Effect of treatment types of recycled concrete aggregates on the properties of concrete,” *Budownictwo i Architektura* 23(3), 129–137 (2024). <https://doi.org/10.35784/bud-arch.6318>
2. Cuesta, A., Morales, A., De la Torre, A. G., and Aranda, M. A. G., “Recent advances in C-S-H nucleation seeding for improving cement performances,” *Materials* 16, 1462 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16041462>
3. Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., and Scrivener, K., “Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review,” *Cement and Concrete Research* 149, 106564 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
4. Aitcin, P. C., “Accelerators,” in *Science and Technology of Concrete Admixtures*, edited by P. C. Aitcin and R. J. Flatt (Elsevier, Amsterdam, 2016), pp. 405–413. <https://www.sciencedirect.com/book/edited-volume/9780081006931/science-and-technology-of-concrete-admixtures>
5. Szostak, B. and Golewski, G. L., “Effect of nano admixture of CSH on selected strength parameters of concrete including fly ash,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 416, 012105 (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/416/1/012105>
6. Carter, P. D., and Wong, J., “Lessons Learned from a Successful Shotcrete Repair,” in *Proceedings of the 10th International Conference on Shotcrete for Underground Support* (2012). [https://doi.org/10.1061/40885\(215\)29](https://doi.org/10.1061/40885(215)29)
7. Atynian, A., Dzhahalov, M., Butnik, S., Tkachenko, R., and Hovorukha, I., “Improvement of technology of production of crushed stone-mastic asphalt concrete mixture by adding reinforcing additives,” *Veda a Perspektivy* 6(37), 284–295 (2024). [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-6\(37\)-284-295](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-6(37)-284-295)
8. Atynian, A., Bratishko, S., Butnik, S., Zhyhlo, A., and Buhaevskiy, V., “Use of carbon composites in repair of overpasses and bridges,” *Veda a Perspektivy* 8(39), 213–225 (2024). [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-8\(39\)-213-225](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-8(39)-213-225)
9. Atynian, A., Bukhanova, K., Tkachenko, R., Manuilenko, V., and Borodin, D., “Energy efficient building materials with vermiculite filler,” *International Journal of Engineering Research in Africa* 43, 20–24 (2019). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.43.20>
10. Trykoz, L. and Pustovoitova, O., “Effective waterproofing of railway culvert pipes,” *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 14(4), 473–483 (2019). <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2019-14.453>

11. Atynian, A., Trykoz, L., and Borodin, D., "Protection of railway infrastructure objects against electrical corrosion," *Anti-Corrosion Methods and Materials* (2021). <https://doi.org/10.1108/ACMM-05-2021-2483>
12. Trykoz, L. V., Kamchatnaya, S. M., Pustovoitova, O. M., and Atynian, A. O., "Reinforcement of composite pipelines for multipurpose transportation," *Transport Problems* 13(1), 69–79 (2018). <https://doi.org/10.21307/tp.2018.13.1.7>
13. Shehata, M., Navarra, M., Klement, T., Lachemi, M., and Sche, H., "Advances in sprayed concrete (shotcrete)," in *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, 2nd ed. (Woodhead Publishing, 2019), pp. 289–306.
14. Artioli, G., Ferrari, G., Dalconi, M. C., and Valentini, L., "Nanoseeds as modifiers of the cement hydration kinetics," in *Smart Nanococoncretes and Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications*, edited by M. Shahir Liew et al. (Elsevier, Amsterdam, 2020), pp. 257–269. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00010-6>
15. Wang, Y., Shi, C., Ma, Y., Xiao, Y., and Liu, Y., "Accelerators for shotcrete – Chemical composition and their effects on hydration, microstructure and properties of cement-based materials," *Construction and Building Materials* 281, 122557 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122557>
16. Tao, Y., Rahul, A. V., Mohan, M. K., De Schutter, G., and Van Tittelboom, K., "Recent progress and technical challenges in using calcium sulfoaluminate (CSA) cement," *Cement and Concrete Composites* 137, 104908 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104908>
17. Çakıroğlu, M. A., Ince, G., Kabas, H. T., and Ali, A., "Experimental examination of the behavior of shotcrete-reinforced masonry walls and XGBoost neural network prediction model," *Arabian Journal for Science and Engineering* 46, 10613–10630 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05657-w>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 13.05.2026	Received 13.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 15.05.2026	Received in revised form 15.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

A. O. Atynian

Ph.D. in Engineering, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6667-6869>

Department Computer Graphics

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, Ukraine, 61001

I. V. Shumakov

D.S in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1502-051X>

Department of Technology and Organization in Construction

A.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, St. Chernoglazivska, 17, Kharkiv, 61002Ukraine, 61002

A. R. Ibragimov

Postgraduate, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7469-6285>

Department of Technology and Organization in Construction

A.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, St. Chernoglazivska, 17, Kharkiv, 61002Ukraine, 61002

O. A. Gvozdiuk

Postgraduate, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7856-9094>

Department Building Constructions

A.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, St. Chernoglazivska, 17, Kharkiv, 61002Ukraine, 61002

O. M. Pustovoitova*

Associate Professor, Ph.D. in Engineering, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4774-6686>

Department Computer Graphics

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, Ukraine, 61001

*corresponding author, e-mail: oksana_pustov@ukr.net

Analysis of organizational and technological solutions using innovative materials in the restoration of bridge structures

How to Cite:

Atynian A. O., Shumakov I. V., Ibragimov A. R., Gvozdiuk O. A., Pustovoitova O. M. (2026). Analysis of organizational and technological solutions using innovative materials in the restoration of bridge structures. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 140-152. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-11](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-11)

Abstract. The article presents the results of a theoretical substantiation and practical implementation of organisational and technological solutions for repair, restoration and reconstruction works of bridge structures damaged during operation or as a result of emergency impacts. The proposed solutions are based on scientific developments of Kharkiv researchers in the field of construction technologies, reconstruction engineering and the use of modern composite and repair materials. Particular attention is paid to improving the efficiency of restoration processes under conditions of limited time, resources and the need to ensure uninterrupted operation of transport infrastructure facilities. A general concept for the restoration of bridge structures has been developed, which considers the entire life cycle of the facility - from inspection and assessment of technical condition to the selection of optimal organisational and technological measures, implementation of repair works and further monitoring of operational reliability. Based on this concept, an enlarged algorithm for making engineering decisions has been proposed. The algorithm allows the determination of the most effective restoration scenario depending on the degree of damage, operational conditions, economic feasibility and available technical resources. Several possible alternatives are considered, including conservation of the structure, partial strengthening, complete reconstruction or dismantling of the facility with subsequent replacement.

The developed calculation models and organisational-technological schemes include the use of modern repair technologies, high-performance equipment, fibre-reinforced composites, polymer-modified repair mortars and innovative methods for strengthening load-bearing structures. The proposed approaches enable optimisation of labour resources, reduction of construction and installation time, minimisation of traffic interruptions and improvement of occupational safety during repair works.

Keywords: bridge structures, reconstruction, composite materials, structural strengthening, infrastructure durability.

УДК 691.001.5:332.146.2:725

Г. О. Татарченко*,

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-0337>

Д. М. Безпалій,

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5663-5447>

Кафедра будівництва, урбаністики та просторового планування

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна.

*автор-кореспондент, e-mail: tatarchenko@snu.edu.ua

Оцінка енергоефективності та принципів Smart City на повному життєвому циклі будівель

Цитувати як:

Татарченко, Г. О., Безпалій, Д. М. (2026). Оцінка енергоефективності та принципів Smart City на повному життєвому циклі будівель. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 153-164. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-12)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. Життєвий цикл будівлі охоплює основні етапи: проєктування, будівництво, експлуатацію та виведення з експлуатації. На кожному з цих етапів формуються відповідні показники енергоефективності. У статті представлено інтегральний аналіз результатів експертного опитування (n = 103, 48 показників) щодо енергоефективності та принципів Smart City на всіх етапах життєвого циклу будівлі. Кожен показник оцінювався за 5-бальною порядковою шкалою Лайкерта. Підтверджено високу експертну підтримку запропонованої моделі сталості та валідність сформованого інструмента оцінювання (α -Кронбаха $\alpha = 0,997$). Структура опитування побудована за модулями стандарту EN 15978:2011: Блок 1 — Планування і проєктування (A1–A3), Блок 2 — Будівництво (A4–A5), Блок 3 — Експлуатація (B1–B7), Блок 4 — Демонтаж/end-of-life (C1–C4). Найвищу значущість експерти надали стадіям проєктування та експлуатації, де можливість впливу на енергоефективність і функціонування будівлі є найбільшими. Експлуатаційний етап продемонстрував найвищий рівень узгодженості оцінок, а пріоритетними показниками визначено ефективність HVAC-систем ($M = 4,64$) та енергоефективне освітлення з інтелектуальним керуванням ($M = 4,55$). Найнижчі оцінки отримала стадія демонтажу та повторного використання матеріалів, що вказує на недостатній рівень розвитку принципів циркулярної економіки. Узагальнення результатів дозволило сформулювати «проєктно-експлуатаційне ядро» сталості будівель, до якого належать: попередній аналіз енергопотреб, пасивні архітектурні рішення, оптимізація орієнтації будівлі, ефективність HVAC-систем та інтелектуальне освітлення. Перспективи подальших досліджень пов'язані з адаптацією запропонованого підходу до різних типів будівель, інтеграцією LCA-

аналізу та розробленням динамічного індексу сталості, що враховуватиме розвиток Smart-технологій і циркулярної економіки.

Ключові слова: життєвий цикл будівлі, розумне місто, енергоефективність, циркулярна економіка, експертне опитування, містобудування

Вступ. Сучасний розвиток урбанізованих територій характеризується активним впровадженням концепції Smart City, що передбачає інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у міську інфраструктуру з метою підвищення ефективності використання ресурсів та якості життя населення [1, 2]. Одним із ключових елементів цієї концепції є будівлі, які споживають значну частку енергоресурсів і суттєво впливають на екологічний стан довкілля. У цьому контексті актуальним є комплексний підхід до оцінки енергоефективності будівель на всіх етапах їх життєвого циклу — від проектування до утилізації.

Життєвий цикл будівлі охоплює основні етапи: проектування, будівництво, експлуатацію та виведення з експлуатації. На кожному з цих етапів формуються відповідні показники енергоефективності. Зокрема, на стадії проектування визначаються базові параметри енергоспоживання, обираються матеріали та технологічні рішення, що впливають на подальшу ефективність будівлі. На етапі будівництва важливим є дотримання технологічних норм і контроль якості виконання робіт. У період експлуатації відбувається фактичне споживання енергії, яке залежить від ефективності інженерних систем, режимів використання будівлі та рівня автоматизації. Завершальний етап передбачає утилізацію або повторне використання матеріалів із мінімізацією негативного впливу на довкілля [3].

На будівельний сектор припадає приблизно 36 % глобального кінцевого енергоспоживання та 39 % енергетичних викидів CO₂, з яких 11–15 % припадають на стадії будівництва, монтажу та end-of-life процеси (за оцінками IEA, UN Environment Global Status Report) [4]. Європейська директива щодо енергетичної ефективності будівель [5], Регламент про будівельні вироби [6], Рамкова директива про відходи 2008/98/EC [7] та стандарт ISO 20887:2020 [8] формують нормативну базу, що вимагає узгодженої оцінки енергетичних та екологічних характеристик на всіх стадіях життєвого циклу — від концепції та проектування через будівництво, експлуатацію до завершального демонтажу.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Загалом, основна мета "розумних міст" полягає в об'єднанні даних, цифрових технологій та інтелектуальної інфраструктури для покращення якості життя та підтримки розвитку стійких, життєздатних і інклюзивних послуг. Стійкість проявляється у всіх технологіях «розумного міста». До її вимог належать масштабованість, ефективність використання енергії та ресурсів, безпека, відмовостійкість та доступність. Дотримання цих вимог дозволяє технологіям

сприяти досягненню численних цілей [9]. Попри існування зрілих рейтингових систем сталого будівництва (LEED, BREEAM, DGNB), у методології інтегральної оцінки сталості залишаються методологічні прогалини, особливо в частині визначення відносної ваги стадій життєвого циклу для країн перехідної економіки в умовах постконфліктної відбудови.

У роботі [10] доводиться, що операційний та втілений вуглець визначаються рішеннями стадій проєктування і експлуатації, тоді як будівництво і демонтаж виконують переважно роль стадій передачі. Серед розглянутих сценаріїв у [11] найефективнішими виявилися дві комбінації: залізобетонні теплоізоляційні панелі з пінополістиролом (EPS) для покрівлі, які дозволили скоротити енергоспоживання на 37 %, та цегла з попелу з використанням EPS як для стін, так і для покрівлі, що забезпечило зниження на 34 %.

Дослідження циркулярної економіки у будівництві [12, 13] вказують, що селективний демонтаж і передзносний аудит залишаються недостатньо впровадженими навіть на зрілих європейських ринках. Методи оцінки життєвого циклу (LCA) вже давно застосовуються для екологічної оцінки процесів розробки продукції в інших галузях, хоча їхнє використання у будівельному секторі вважається передовим методом лише протягом останніх 10 років [14]. Стандарти EN 15978:2011 [15] та ISO 20887:2020 [8] формують методологічну основу для оцінки екологічної ефективності будівель на всіх етапах життєвого циклу, проте їх імплементація в національну нормативну базу України потребує адаптації. Це особливо важливо при комплексному підході до розробки нових генеральних планів міст, що постраждали від війни [16].

Запропоноване дослідження адресує цю прогалину через структуроване експертне опитування з двома цілями: по-перше, кількісно визначити рівень професійного консенсусу щодо 48 показників, розподілених по чотирьох блоках життєвого циклу; по-друге, вивести емпірично обґрунтовану систему вагових коефіцієнтів стадій для інтегрального індексу сталої готовності будівлі, придатного для національної нормативної імплементації.

Метою дослідження є кількісне визначення експертних пріоритетів щодо 48 показників енергоефективності та принципів Smart City, розподілених по чотирьох блоках життєвого циклу будівлі для інтегрального індексу сталої готовності будівлі, придатного для національної нормативної імплементації в умовах гармонізації з європейськими стандартами.

Результати та обговорення. Структуроване експертне опитування проведено серед 103 респондентів ($n = 103$), що представляють фахівців будівельної галузі, студентів профільних спеціальностей, консультантів зі сталого розвитку, академічних дослідників та пересічних громадян. Гранична

похибка вибірки при довірчій ймовірності 95 % перебуває у межах $\pm 9,7$ %. Кожен показник оцінювався за 5-бальною порядковою шкалою Лайкерта: 1 — не потрібно; 2 — потрібно в мінімальному ступені; 3 — потрібно частково; 4 — потрібно значною мірою; 5 — потрібно обов'язково.

Чотири блоки опитування визначено відповідно до модульної структури стандарту EN 15978:2011 [5]: Блок 1 — Планування і проєктування (модулі A1–A3); Блок 2 — Будівництво (A4–A5); Блок 3 — Експлуатація (B1–B7); Блок 4 — Демонтаж/end-of-life (C1–C4). Для кожного блоку сформульовано 12 показників, що збалансовано і порівнянно охоплюють енергетичний, ресурсний, екологічний, цифровий та Smart City виміри.

Для кожного показника обчислено: зважений середній M , середньоквадратичне відхилення σ , коефіцієнт варіації $CV = \sigma/M \cdot 100$ %, медіану M_e , моду M_o , частку підтримки (% (4+5)), частку заперечення (% (1+2)) та нормований індекс згоди $IC = (M - 1)/4 \in [0; 1]$. Внутрішню узгодженість інструмента перевірено за коефіцієнтом α -Кронбаха як для повного 48-пунктного інструмента, так і для кожного блоку окремо. Міжблочні відмінності перевірено за допомогою непараметричних тестів — критерію Фрідмана та критерію Краскела–Волліса [17].

48-пунктний інструмент продемонстрував дуже високу внутрішню узгодженість: коефіцієнт α -Кронбаха становить $\alpha = 0,997$ для повного набору і $\alpha_{B1} = 0,989$; $\alpha_{B2} = 0,990$; $\alpha_{B3} = 0,989$; $\alpha_{B4} = 0,991$ для окремих блоків. Усі поблочні значення стабільно перевищують поріг прийнятності 0,70, що підтверджує надійність інструмента для подальшого інференційного аналізу. У таблиці 1 наведено п'ять найвище і п'ять найнижче ранжованих показників із усього 48-пунктного інструмента.

Кластер топ-5 показників сформовано переважно з пунктів Блоку 3 (Експлуатація) і Блоку 1 (Планування і проєктування), що відображає експертний фокус на двох стадіях, де енергозберігаючі рішення мають найбільший вплив на сукупний експлуатаційний слід будівлі впродовж 50–70-річного періоду. Кластер боттом-5 формує переважно Блок 4 (Демонтаж) і включає циркулярно-економічні показники, реалізація яких критично залежить від зрілого ринку вторинних матеріалів — на сьогодні нерозвинутого в національному контексті [12, 13, 18].

На рис. 1 представлено чотири панелі порівняльних блоків. Панель (а) виявляє M -подібну траєкторію $M_{B1} \rightarrow M_{B2} \rightarrow M_{B3} \rightarrow M_{B4}$ з піками на стадіях проєктування та експлуатації; панель (б) показує, що частки підтримки коливаються від 66,1 % (B4) до 82,0 % (B3), а частки заперечення — від 3,3 % (B3) до 9,3 % (B4); панель (в) підтверджує, що всі блоки залишаються нижче порога однорідності $CV = 33$ %; панель (г) представляє багатокритеріальний радар нормованих метрик, в якому Блок 3 формує найбільший зовнішній контур, а Блок 4 — найменший внутрішній, що

підтверджує статус експлуатаційної стадії як стадії з найбільшим консенсусом, а демонтажу — як найбільш дискусійної. На рис. 2 візуалізовано М-подібну траєкторію важливості впродовж життєвого циклу та емпірично виведені вагові коефіцієнти стадій для інтегрального індексу сталої готовності будівлі.

Таблиця 1. Найвище і найнижче ранжовані показники по повному життєвому циклу (n = 103)

Ранг	Код	Показник	Блок	M	CV, %	Sup, %
1	Q3.2	Ефективність системи HVAC	Б3	4,64	14,9	91,3
2	Q3.3	Енергоефективне освітлення (LED + смарт)	Б3	4,55	15,8	92,2
3	Q1.3	Концептуальне дослідження енергопотреб	Б1	4,50	19,1	86,4
4	Q1.1	Пасивні архітектурні рішення	Б1	4,46	17,9	86,4
5	Q1.4	Оптимізація орієнтації будівлі	Б1	4,45	19,5	87,4
...
44	Q2.4	Перероблені / вторинні матеріали	Б2	3,67	28,5	62,1
45	Q4.12	Повторне використання елементів	Б4	3,64	31,3	63,1
46	Q4.1	Селективний демонтаж	Б4	3,63	27,8	52,0
47	Q4.9	Заміщення первинних матеріалів вторинними	Б4	3,60	32,2	51,9
48	Q2.5	Енергоефективність будівельної техніки	Б2	3,57	30,1	56,4

Експлуатаційна стадія (Блок 3) показала найвищий агрегатний консенсус за всіма метриками ($\bar{M} = 4,32$; $\bar{CV} = 19,2$ %; підтримка 82,0 %; заперечення 3,3 %; $\alpha = 0,989$). Два найвище ранжованих показники всього 48-пунктного інструмента — ефективність HVAC ($M = 4,64$; $CV = 14,9$ %; підтримка 91,3 %) та енергоефективне освітлення з інтелектуальним керуванням ($M = 4,55$; підтримка 92,2 %) — належать саме до цієї стадії, що обґрунтовує їх ідентифікацію як пріоритетних важелів національного нормативного посилення в гармонізації з EPBD recast 2024 [19]. Три показники Блоку 3 домінують у глобальному рейтингу: ефективність HVAC

($M = 4,64$; $CV = 14,9\%$), LED-освітлення з інтелектуальним керуванням ($M = 4,55$) і якість повітря у приміщеннях ($M = 4,43$). Усі три відповідають зрілим технологіям зі швидкою окупністю (модернізація HVAC — 5–10 років; LED — 2–4 роки) і чіткими нормативними мандатами за [16] та ASHRAE [20].

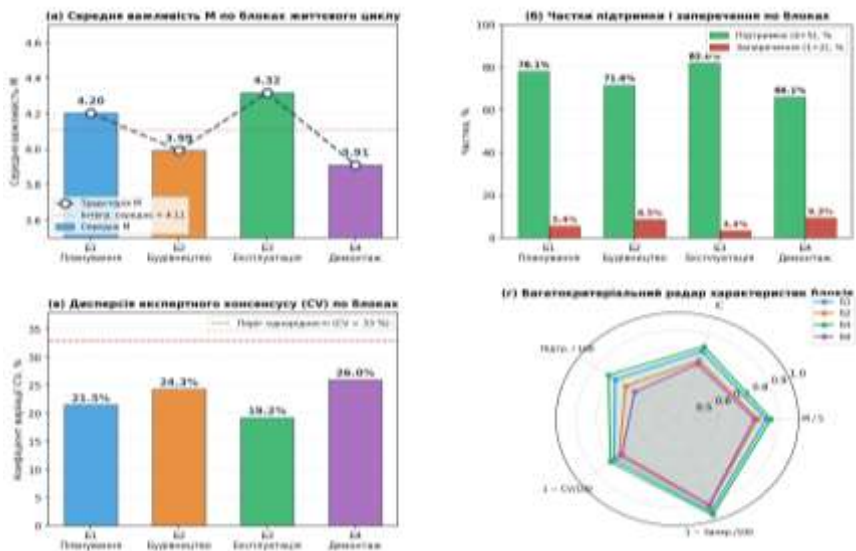


Рис. 1 — Порівняльна експертної оцінки за чотирма блоками життєвого циклу ($n = 103$)

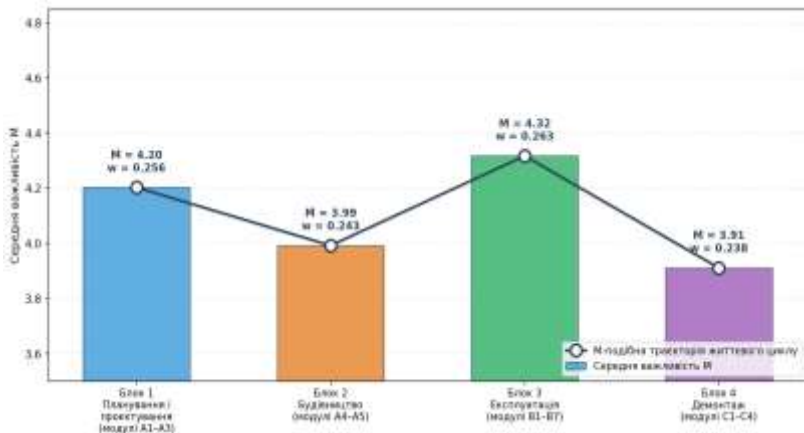


Рис. 2 — М-подібна траєкторія експертної важливості впродовж життєвого циклу будівлі та виведення нормалізованих стадійних ваг для інтегрального індексу сталості

Натомість блок демонтажу демонструє найвищу дисперсію ($C\bar{V} = 26,0$ %), найнижчу підтримку (66,1 %) і найвищу частку заперечення (9,3 %). Чотири найнижче ранжованих показники end-of-life стадії (селективний демонтаж, заміщення первинних матеріалів вторинними, повторне використання елементів, end-of-life облік CO₂) у своїй реалізації залежать від зрілого ринку вторинних матеріалів, інституціоналізованих методик передзносного аудиту та гармонізованих LCA-фреймворків.

Три групи наскрізних показників демонструють надзвичайно стабільні експертні оцінки в усіх чотирьох блоках, що свідчить про сильну конвергенцію професійної думки: цифровий інструментарій (BIM, smart construction, інтеграція Smart City) стабільно отримує 4,22–4,31; захист і обслуговування матеріалів — стабільно 4,31–4,40; управління відходами на кожній стадії — стабільно 4,12–4,27 з підтримкою 76–82 %.

Ці конвергентні пріоритети визначають те, що можна назвати інваріантами життєвого циклу — тематичні напрями, які мають бути нормативно вирішені на всіх стадіях, а не лише на одній.

Домінування HVAC і освітлення в експлуатаційному блоці ($M = 4,64$; $M = 4,55$) узгоджується зі звітом IEA Energy Efficiency 2023 [4], який ідентифікує HVAC і освітлення як найбільші окремі джерела операційних енергозбережень у комерційних та житлових будівлях. Висока важливість, надана BIM та цифровому моніторингу ($M = 4,22$ у Б2; $M = 4,31$ у Б1), узгоджується зі стратегією ЄС Renovation Wave [21], яка позиціонує цифровізацію як горизонтальний помічник процесів реновації будівельного фонду.

Стадію демонтажу (Блок 4) ідентифіковано як методологічно найменш зрілий сегмент життєвого циклу ($\bar{M} = 3,91$; $C\bar{V} = 26,0$ %; підтримка 66,1 %; заперечення 9,3 %). Чотири найнижче ранжованих показники всього інструмента — заміщення первинних матеріалів вторинними ($M = 3,60$), селективний демонтаж ($M = 3,63$), повторне використання елементів ($M = 3,64$) та end-of-life облік CO₂ ($M = 3,68$) — кластеризовано саме в цьому блоці і визначають чіткий пріоритет нормативної реформи в гармонізації з Європейськими документами.

Знижені оцінки циркулярно-економічних показників стадії демонтажу узгоджуються з висновками Akhimien et al. [12] та Charef & Lu [13], які повідомляють, що селективний демонтаж і передзносний аудит залишаються недостатньо впровадженими навіть на зрілих європейських ринках.

Висновки. Інтегральний аналіз результатів експертного опитування з енергоефективності та принципів Smart City на всіх етапах життєвого циклу будівлі ($n = 103$, 48 показників) підтвердив високу експертну підтримку запропонованої моделі сталості та валідність сформованого інструмента оцінювання.

Найвищу значущість експерти надали стадіям проектування та експлуатації, де можливості впливу на енергоефективність і функціонування будівлі є найбільшими. Експлуатаційний етап продемонстрував найвищий рівень узгодженості оцінок, а найбільш пріоритетними показниками визначено ефективність HVAC-систем та енергоефективне освітлення з інтелектуальним керуванням, що свідчить про необхідність посилення уваги до інженерних систем будівель у процесі гармонізації національних нормативів із положеннями EPBD recast 2024.

Найнижчі оцінки отримала стадія демонтажу та повторного використання матеріалів, що вказує на недостатній рівень розвитку принципів циркулярної економіки у будівельній галузі та визначає необхідність удосконалення нормативної бази відповідно до ISO 20887:2020, EN 15978:2011 та європейських підходів до управління будівельними відходами. Узагальнення результатів дозволило сформувати «проектно-експлуатаційне ядро» сталості будівель, до якого належать: попередній аналіз енергопотреб, пасивні архітектурні рішення, оптимізація орієнтації будівлі, ефективність HVAC-систем та інтелектуальне освітлення; саме ці показники доцільно розглядати як основу для формування національної системи оцінювання сталості будівель.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з адаптацією запропонованого підходу до різних типів будівель, інтеграцією LCA-аналізу та розробленням динамічного індексу сталості, що враховуватиме розвиток Smart-технологій і циркулярної економіки.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Sanchez-Gallegos, D. D., Carrizales-Espinoza, D. E., Torres-Charles, C., & Carretero, J. (2025). Smart Cities: A Systematic Review of Emerging Technologies. *Smart Cities*, 8(5), 173. <https://doi.org/10.3390/smartcities8050173>
2. Alvitez Adan, T. E. (2025). Research Trends on Sustainable Development in Smart Cities. *Discover Sustainability*, 6(1), 369. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01210-z>
3. Biloshytska, N., Tatarchenko, H., Biloshytskiy, M., & Uvarov, P. (2024). Analiz stanu zhytlovoho fondu m. Sievierodonetsk na pochatok 2022 roku. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 85, 31–49. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.31-49>
4. International Energy Agency. (2023). *Energy Efficiency 2023*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
5. European Committee for Standardization. (2026). *EN 15978:2026. Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Requirements and guidance*. CEN.
6. European Parliament. (2024). Regulation (EU) 2024/3110 of 27 November 2024 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products (CPR 2024). *Official Journal of the European Union*, L-series. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275
7. European Parliament. (2008/2018). *Directive 2008/98/EC of 19 November 2008 on waste (Waste Framework Directive), consolidated version 2018*. <https://cybsec.lawthek.eu/detail/8b3c419b-acd4-4ead-a979-8576da0e311e/en/SINGLE?date=2024-02-17>
8. International Organization for Standardization. (2020). *ISO 20887:2020. Sustainability in buildings and civil engineering works — Design for disassembly and adaptability — Principles, requirements and guidance*. ISO.
9. Javed, A. R., Shahzad, F., Ur Rehman, S., Zikria, Y. B., Razzak, I., Jalil, Z., & Xu, G. (2022). Future smart cities: Requirements, emerging technologies, applications, challenges, and future aspects. *Cities*, 129, 103794. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103794>
10. Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., et al. (2020). Embodied GHG emissions of buildings — The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
11. Zahoor, H., & Jadoon, A. A. (2025). Energy efficiency and life cycle cost analysis of residential buildings using sustainable building materials. *Journal of Building Engineering*, 114, 114243. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2025.114243>
12. Akhimien, N. G., Latif, E., & Hou, S. S. (2021). Application of circular economy principles in buildings: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 38, 102041. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.102041>
13. Charef, R., & Lu, W. (2022). Factor dynamics to facilitate Circular Economy adoption in construction. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128639>
14. Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilarinho, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the

building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>

15. European Committee for Standardization. (2011). *EN 15978:2011. Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method*. CEN.

16. Tatarchenko, H., & Porkuiian, S. (2024). Formuvannya kompleksnoho pidkhodu do povoiennoho skladannya novoho heneralnogo planu mist. *Prostorovyi rozvytok*, 7, 310–320. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.310-320>

17. Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. K. (2015). Likert Scale: Explored and Explained. *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(4), 396–403. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/14975>

18. European Commission. (2018). *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d63d5a8f-64e8-11ef-a8ba-01aa75ed71a1/language-en>

19. European Parliament. (2024). *Directive (EU) 2024/1275 on the Energy Performance of Buildings (EPBD recast)*. Official Journal of the European Union, L-series.

20. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ASHRAE Standard 62.1-2022. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/62_1_2022_x_20221108.pdf

21. European Commission. (2020). *A Renovation Wave for Europe — greening our buildings, creating jobs, improving lives* (COM(2020) 662 final). <https://ec.europa.eu/newsroom/clima/items/690287/>

Список використаних джерел

1. Sanchez-Gallegos, D. D., Carrizales-Espinoza, D. E., Torres-Charles, C., & Carretero, J. (2025). Smart Cities: A Systematic Review of Emerging Technologies. *Smart Cities*, 8(5), 173. <https://doi.org/10.3390/smartcities8050173>

2. Alvitez Adan, T. E. (2025). Research Trends on Sustainable Development in Smart Cities. *Discover Sustainability*, 6(1), 369. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01210-z>

3. Білошицька, Н., Татарченко, Г., Білошицький, М., Уваров П. (2024). Аналіз стану житлового фонду м. Северодонецьк на початок 2022 року.- *Містобудування та територіальне планування*, 85. 31-49. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.31-49>

4. International Energy Agency. (2023). *Energy Efficiency 2023*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>

5. European Committee for Standardization. (2026). *EN 15978:2026. Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Requirements and guidance*. CEN.

6. European Parliament. (2024). Regulation (EU) 2024/3110 of 27 November 2024 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products (CPR 2024). *Official Journal of the European Union*, L-series. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275

7. European Parliament. (2008/2018). *Directive 2008/98/EC of 19 November 2008 on waste (Waste Framework Directive), consolidated version 2018*. <https://cybsec.lawthek.eu/detail/8b3c419b-acd4-4ead-a979-8576da0e311e/en/SINGLE?date=2024-02-17>

8. International Organization for Standardization. (2020). *ISO 20887:2020. Sustainability in buildings and civil engineering works — Design for disassembly and adaptability — Principles, requirements and guidance*. ISO.
9. Javed, A. R., Shahzad, F., Ur Rehman, S., Zikria, Y. B., Razzak, I., Jalil, Z., & Xu, G. (2022). Future smart cities: Requirements, emerging technologies, applications, challenges, and future aspects. *Cities*, 129, 103794. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103794>
10. Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., et al. (2020). Embodied GHG emissions of buildings — The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
11. Zahoor, H., & Jadoon, A. A. (2025). Energy efficiency and life cycle cost analysis of residential buildings using sustainable building materials. *Journal of Building Engineering*, 114, 114243. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114243>
12. Akhimien, N. G., Latif, E., & Hou, S. S. (2021). Application of circular economy principles in buildings: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 38, 102041. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102041>
13. Charef, R., & Lu, W. (2022). Factor dynamics to facilitate Circular Economy adoption in construction. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128639>
14. Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
15. European Committee for Standardization. (2011). *EN 15978:2011. Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method*. CEN.
16. Татарченко, Г., Поркуян С. (2024). Формування комплексного підходу до повоєнного складання нового генерального плану міст. Просторовий розвиток, 7, 310–320. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.310-320>
17. Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. K. (2015). Likert Scale: Explored and Explained. *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(4), 396–403. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/14975>
18. European Commission. (2018). *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d63d5a8f-64e8-11ef-a8ba-01aa75ed71a1/language-en>
19. European Parliament. (2024). *Directive (EU) 2024/1275 on the Energy Performance of Buildings (EPBD recast)*. *Official Journal of the European Union*, L-series.
20. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ASHRAE Standard 62.1-2022. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/62_1_2022_x_20221108.pdf
21. European Commission. (2020). *A Renovation Wave for Europe — greening our buildings, creating jobs, improving lives* (COM(2020) 662 final). <https://ec.europa.eu/newsroom/clima/items/690287/>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 13.05.2026	Received 13.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 15.05.2026	Received in revised form 15.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

H. Tatarchenko*,

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-0337>

D. Bezpalyy,

PhD Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5663-5447>

Department of Civil Engineering, Urbanism and Spatial Planning

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 17 Ioanna Pavla Druhoho Str., Kyiv, 01042, Ukraine

*corresponding author, e-mail: tatarchenko@snu.edu.ua

Assessment of Energy Efficiency and Smart City Principles over the Full Building Life Cycle

How to Cite:

Tatarchenko, H., Bezpalyy, D. (2026). Assessment of Energy Efficiency and Smart City Principles over the Full Building Life Cycle. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, 25, 153-164. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-12)

Abstract. The life cycle of a building comprises the following main stages: design, construction, operation and decommissioning. At each of these stages, corresponding energy efficiency indicators are established. This article presents an integrated analysis of the results of an expert survey (n = 103, 48 indicators) on energy efficiency and Smart City principles at all stages of a building's life cycle. Each indicator was assessed using a 5-point Likert scale. High expert support for the proposed sustainability model and the validity of the developed assessment tool (Cronbach's $\alpha = 0.997$) were confirmed. The structure of the survey is based on the modules of standard EN 15978:2011: Block 1 — Planning and Design (A1–A3), Block 2 — Construction (A4–A5), Block 3 — Operation (B1–B7), Block 4 — Demolition/end-of-life (C1–C4). The experts assigned the highest importance to the design and operation stages, where the potential to influence the energy efficiency and functioning of the building is greatest. The operation stage demonstrated the highest level of consensus in the assessments, with the efficiency of HVAC systems ($M = 4.64$) and energy-efficient lighting with smart control ($M = 4.55$) identified as priority indicators. The lowest ratings were given to the demolition and material reuse stage, indicating an insufficient level of development of circular economy principles. The lowest scores were given to the stage involving the dismantling and reuse of materials, which indicates an insufficient level of development of circular economy principles. A synthesis of the results enabled the formation of a 'design-operation core' of building sustainability, comprising: preliminary analysis of energy requirements, passive architectural solutions, optimisation of building orientation, efficiency of HVAC systems, and smart lighting. Prospects for further research relate to adapting the proposed approach to different types of buildings, integrating LCA analysis, and developing a dynamic sustainability index that will take into account the development of smart technologies and the circular economy.

Keywords: building life cycle, Smart City, energy efficiency, circular economy, expert survey, urban planning.

УДК 711.4:725.4

Н.І. Білошицька*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-2885>

М.В. Білошицький

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9935-4161>

П.Є. Уваров

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3310-5719>

Кафедра будівництва, урбаністики та просторового планування

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна.

*автор-кореспондент, e-mail: beloshitska@snu.edu.ua

Концептуальні засади та напрями ревіталізації промислових і депресивних територій українських міст у контексті сталого розвитку

Цитувати як:

Білошицька, Н. І., Білошицький, М. В., Уваров, П. Є. (2026). Концептуальні засади та напрями ревіталізації промислових і депресивних територій українських міст у контексті сталого розвитку. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 165-177. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-13](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-13)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розглянуто концептуальні засади ревіталізації промислових і депресивних територій як комплексного процесу трансформації застарілих міських просторів та інструменту сталого розвитку сучасних міст. Зроблено аналіз історичних передумов виникнення браунфілдів і депресивних територій, узагальнено міжнародний досвід країн ЄС, Великої Британії, Канади та Японії щодо подолання територіальної депресивності. Систематизовано класифікацію браунфілдів за моделлю А-В-С (саморозвинені, потенційного розвитку, нерозвинені) та обґрунтовано економічну доцільність ревіталізації для кожної категорії. Виокремлено чотири ключові складові ревіталізації: економічну, соціальну, екологічну та просторову. Визначено основні напрями перетворення промислових територій в Україні: на громадсько-ділові зони, житлову забудову та рекреаційні простори. Розглянуто українські приклади ревіталізації (арт-завод «Платформа», простір «Більшовик», «Промприлад. Реновація»). На прикладі м. Києва оцінено потенціал ревіталізації промислових територій (≈6,9 тис. га, або 7,9-8% території міста). Сформульовано перелік містобудівних, об'ємно-планувальних, конструктивних, екологічних та естетичних факторів успішної реалізації проектів ревіталізації.

Ключові слова: ревіталізація, браунфілди, депресивні території, реконструкція, сталий розвиток, містобудування.

Вступ

У контексті сучасного містобудування ревіталізація промислових і депресивних територій стала невід'ємною складовою процесів сталого розвитку міст, інтеграції соціально-економічних та екологічних функцій, а також підвищення конкурентоспроможності урбанізованих територій та формування сприятливого середовища життєдіяльності для сьогodнішніх та майбутніх поколінь мешканців [1, 2]. Ревіталізація означає цілісну трансформацію застарілих та депресивних територій, що втратили первинні функції, з метою створення нових соціально-економічних, екологічних і культурно-рекреаційних ресурсів міста [3].

Активні урбанізаційні процеси спричинили необхідність збільшення житлової території у містах без зменшення зелених насаджень. Ревіталізація невикористовуваних промислових зон дає змогу отримати додаткові території під забудову у інвестиційно привабливій та перспективній центральній частині міста.

Таким чином, актуальним постає питання щодо розробки комплексного підходу до оцінки та реалізації проєктів ревіталізації промислових і депресивних територій українських міст, який би об'єднував принципи сталого розвитку, енергоефективності, циркулярної економіки, цифровізації управління з урахуванням специфічних викликів постконфліктної відбудови.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Концепція ревіталізації була сформована у міжнародній містобудівній теорії як комплексна категорія, що позначає не лише фізичну реконструкцію матеріального середовища, а й системний процес соціально-економічного, екологічного та культурного відновлення урбанізованих територій, які зазнали структурної деградації. У роботі [4], ревіталізація визначається як «комплексне і інтегроване бачення та дія, що ведуть до вирішення міських проблем і прагнуть забезпечити тривале покращення економічних, фізичних, соціальних та екологічних умов території, яка зазнала змін». Подібний підхід згодом було розвинено у [5], де концептуалізується соціальна сталість як ключовий вимір ревіталізації, що різнить її від суто архітектурно-будівельних понять реконструкції чи реновації.

Автори [6, 7] у своїх дослідженнях узагальнюють, що еволюція концепту brownfield пройшла три ключові етапи: первісне розуміння як санації забруднених ділянок (1980-ті рр.); розширення до економічної регенерації (2000-ні рр.); інтеграція принципів сталого розвитку як інструмента урбаністичного відновлення (2015 р. – після прийняття 17 Цілей сталого розвитку ООН і, зокрема, ЦСП 11 «Сталі міста і громади»).

У роботі [8] виділено чотири ключові категорії індикаторів успішності brownfield-редевелопменту: екологічно-санітарні, фінансові, життєздатність та соціально-економічні.

У сучасних роботах [9, 10] brownfield-території переосмислюються не як проблема планування, а як ресурсна можливість для розвитку міських зелених інфраструктурних мереж та джерело відкритого простору в умовах щільної забудови.

Українські дослідники переймають та адаптують це широке трактування. Зокрема, Н. Білошицька, Г. Татарченко, М. Білошицький і Д. Матляк [1] на основі історико-аналітичного огляду формулюють визначення ревіталізації як «комплексу заходів з відновлення промислових об'єктів через адаптивне перепрофілювання та інтеграцію в сучасну міську тканину». О. Жук [11] у дослідженні «Ревіталізація міст» поглиблює це визначення, розкриваючи ревіталізацію як «комплексний процес відновлення урбанізованої території, яка піддалась процесу структурної деградації, спричиняючи кризовий стан, що робить неможливим або суттєво ускладнює нормальний економічний і суспільний розвиток цієї території та сталий розвиток міста». Подібну позицію підтримує С. Горблюк [12], який наголошує на просторовому, економічному, соціальному, культурному, екологічному та публічно-управлінському вимірах ревіталізації.

Метою дослідження є системний аналіз теоретико-методологічних засад та узагальнення міжнародного й вітчизняного досвіду ревіталізації промислових і депресивних територій з обґрунтуванням пріоритетних напрямів та комплексу чинників успішної трансформації цих територій в українських містах з урахуванням принципів сталого розвитку та викликів постконфліктної відбудови.

Матеріали та методи

Дослідження ґрунтується на комплексному використанні теоретичних і аналітичних методів. Інформаційну базу склали міжнародні нормативні документи (New Urban Agenda, Лейпцизька Хартія, EU Nature Restoration Law, Davos Baukultur System), статистичні дані Київської міської державної адміністрації щодо структури землекористування, наукові публікації українських та закордонних дослідників, а також практичні приклади реалізованих проєктів ревіталізації в Україні та країнах ЄС.

У роботі використано такі методи: системно-аналітичний (для узагальнення теоретичних засад ревіталізації); порівняльний (для зіставлення структури землекористування Києва та європейських столиць); типологічний (для систематизації категорій браунфілдів та напрямів їх

трансформації); метод аналогій (для перенесення міжнародного досвіду на українські умови); статистичний (для опрацювання даних щодо площ промислових територій).

Методологічно дослідження спирається на модель А-В-С класифікації браунфілдів, запропоновану авторами [13] у межах мережі CABERNET (Concerted Action on Brownfield and Economic Regeneration Network), а також на чотирискладову концепцію ревіталізації (економічна, соціальна, екологічна, просторова складові), визнану на рівні рекомендацій OECD.

Результати та обговорення

На відміну від великих міст зі стрімким ростом урбанізації, існують регіони та міста, де відбувається відтік населення через закриття підприємств і зменшення робочих місць. Такі території називають депресивними. Під депресивними районами розуміють такі території, в яких нині нижчі показники соціально-економічного розвитку, ніж середні показники по країні, але колись у минулому вони мали провідні показники. Головною причиною віднесення району до цієї категорії є неспроможність території самостійно подолати соціально-економічну кризу [14].

Виконаний аналіз дозволив систематизувати причини, фактори та відмінні ознаки депресивних територій (табл. 1). Депресивність територій пов'язана з низкою чинників: географічних, історичних, демографічних, економічних, екологічних. Важливу роль відіграє також регіональна політика та дії місцевих адміністрацій.

Таблиця 1. Причини, фактори та ознаки депресивних територій

Найменування	Сутність
Причини виникнення	перехід від планової економіки до ринкової; зниження конкурентоспроможності продукції; скорочення інвестиційного попиту; припинення державних замовлень; скорочення природних ресурсів
Чинники появи	неадаптованість економіки регіону; недостатність бюджетних коштів на розвиток виробництв; спад виробництва та зростання безробіття
Відмінні ознаки	високий рівень накопиченого науково-технічного потенціалу; значна частка промисловості; високий рівень кваліфікації кадрів

Депресивні території не можуть вийти зі стану кризи самостійно, їм потрібна підтримка держави. Уряди ретельно виділяють та стежать за такими територіями з метою організації ефективної підтримки для переходу їх у фазу економічного зростання. У табл. 2 узагальнено стратегії та заходи розвитку депресивних територій, що застосовувалися у різних країнах.

У 1992 р. почали використовувати термін «браунфілд» (brownfield) щодо нефункціонуючих та занедбаних промислових об'єктів, що мають для будівництва комерційний потенціал.

Таблиця 2. Стратегії та заходи розвитку депресивних територій у різних країнах

Територія, країна	Стратегія	Заходи
Уельс, Велика Британія	розвиток вугільного виробництва	залучення приватних інвестицій, спеціальні урядові органи, підтримка іноземних інвесторів
Рурська область, Німеччина	переорієнтація з гірничодобувної на машинобудування, електротехніку, послуги	додаткова допомога депресивним регіонам; єдина схема реформування
Альпійські долини, Франція	формування промислових кластерів	розвиток національних кластерів на базі дослідницьких центрів
Регіон Твенте, Нідерланди	підтримка інновацій	співпраця ВНЗ та промисловості, інноваційна платформа за участі уряду
Східний Квебек, Канада	підвищення рівня життя у регіонах безробіття	«спеціальні області», регіональні стимули, гранти за нові робочі місця
Кобе, Японія	перехід до інноваційної медичної промисловості	створення інтелектуального інноваційного кластера, медичного індустріального міста

Згідно з [14], браунфілди поділяються на три категорії А–В–С відповідно до їх потенціалу розвитку. Ділянки категорії А – це ділянки, що саморозвиваються та самоокупаються; їх регенерація можлива в умовах

вільного ринку без потреби у державному фінансуванні; ринкова вартість землі після ревіталізації значно перевищує витрати. Ділянки категорії В – це ділянки «потенційного розвитку», які вимагають певної (можливо, непрямої) форми державного фінансування або податкових пільг; такі проекти можуть бути реалізовані лише з граничною прибутковістю і здаються занадто ризикованими для приватних інвесторів. Ділянки категорії С – це «нерозвинені» ділянки, регенерація яких являє собою фінансові втрати для інвестора; вона здійснюється в обґрунтованих випадках (захист довкілля, безпека) за рахунок державного фінансування.

Розподіл типів ревіталізованих промислових та депресивних територій за моделлю А–В–С наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Категорії промислових та депресивних територій для ревіталізації

Тип території	Стан	Перепрофілювання	Категорія А-В-С
Промислові зони (Brownfields)	Застаріла забудова, занедбані цехи в межах міста	Креативні хаби, IT-парки, лофти	А: високий
Портові, залізничні території	Логістичні вузли з виходом до води/колій	Набережні, рекреація, ТРЦ	А/В
Депресивні житлові квартали	Низька якість житла, соціальна деградація	Соціальні центри, mixed-use	В/С
Техногенно забруднені ділянки	Хімічне/радіаційне забруднення, звалища	Еко-парки, сонячні станції	С: низький
Військові містечка та об'єкти	Покинуті казарми, ангари	Музеї, тренувальні центри	В

Перші браунфілди з'явилися у США через виведення промислових виробництв за кордон. У 2003 р. у США було прийнято програму редевелопменту браунфілдів. Яскравим прикладом є індустріальний парк High Line у м. Нью-Йорк, розбудований на місці непридатної для використання залізниці у 2004–2014 рр. Ще одним прикладом є район Перл-Дистрикт (Pearl District) у Портленді (штат Орегон), який був занедбаною промисловою зоною; з 1990-х рр. почалося його відновлення, і сьогодні це поєднання житлової забудови із закладами культурно-

побутового обслуговування, розвиненою пішохідно-велосипедною мережею, публічними просторами та трамвайним сполученням.

Програма редевелопменту браунфілдів набула популярності в багатьох країнах світу. Серед європейських прикладів варто відзначити трамвайне депо De Hallen в Амстердамі, що у 2011 р. було пристосоване під бібліотеку мистецтв, драмтеатр, креативні студії, готель та ресторани; вокзал King's Cross у Лондоні (реконструкція 1998–2012 рр.); ландшафтний парк Дуйсбург-Норд у Німеччині, де територія колишнього металургійного заводу площею 180 га перетворена на простір для культурних заходів, альпійський сад, майданчики для скелелазіння та найбільший у Європі дайвінг-центр у газгольдері доменної печі. У 2000 р. парк Дуйсбург-Норд став пам'яткою архітектури.

На сучасному етапі розвитку міст питання ефективного використання територій застарілих і занедбаних промислових підприємств набуває особливої актуальності і для України. У багатьох крупних та найкрупніших містах загострюється проблема оновлення житлового фонду, створення нових просторів для розвитку підприємництва, громадських функцій та рекреації. Однією з головних проблем є складна структура власності таких територій. Великі промислові майданчики нерідко поділені між кількома власниками або перебувають у змішаній формі власності. Тому одним із ключових завдань держави та органів місцевого самоврядування є формування сприятливого інвестиційного середовища, створення стимулів для власників територій та залучення приватних інвесторів до реалізації проєктів ревіталізації.

За даними [15], приблизно 20% території крупних міст займають промислові зони, значна частина яких на сьогодні перебуває у занедбаному або малоефективному стані. Зокрема, у м. Києві промислові та комунально-складські території займають близько 6,9 тис. га ($\approx 7,9\text{-}8\%$ території міста; з комунально-складськими об'єктами та санітарно-захисними зонами – $\approx 13,2$ тис. га), що свідчить про значний потенціал ревіталізації [16]. Узагальнена структура використання території м. Києва за основними функціональними видами наведена у табл. 4.

Таблиця 4. Структура використання території м. Києва

Вид використання території	Частка, %	Площа, тис. га
Житлова та громадська забудова	20,4	$\approx 17,0$
Промислові, виробничі,	7,9	$\approx 6,6$

комунально-складські території		
Транспортна інфраструктура	5,7	≈4,8
Зелені насадження та рекреаційні території	54,5	≈45,5
Водні поверхні	7,3	≈6,1
Інші території	4,0	≈3,3
Загальна площа міста	100	≈83,6

До найбільших промислових районів правобережної частини Києва належать Подільсько-Куренівський промисловий район (891 га), Нивки (560 га), Теличка (424 га), Відрадний (400 га), а також промислові зони Пирогово (171 га) та Корчувате (80 га). На лівому березі найбільшими є Дарницький промисловий район (460 га), Дніпровський (380 га), Троєщина (316 га) та промислова зона Бортничі (324 га).

Порівняльний аналіз структури землекористування показує суттєві відмінності між Києвом та провідними європейськими столицями. Берлін має збалансовану структуру міського простору з високою часткою транспортної інфраструктури та значними рекреаційними територіями; після деіндустріалізації значна частина колишніх промислових зон була трансформована у житлові та культурні простори. Варшава демонструє більш компактну структуру забудови та відносно більшу частку промислових територій серед європейських столиць, що пов'язано з інтенсивним розвитком логістики та виробничих кластерів. Париж характеризується дуже високою щільністю забудови та мінімальною часткою промислових територій (3-4 %); більшість виробництв винесено у передмістя. Київ характеризується значною часткою зелених територій (понад 50 %), що пояснюється наявністю великих лісопаркових масивів та долини р. Дніпро; водночас місто має відносно високу частку промислових територій, сформованих у радянський період.

Відповідно до Генерального плану розвитку Києва до 2025 р. передбачалося скорочення площі промислових територій до 5374 га. Частина звільнених територій планувалася для будівництва торговельно-розважальних та офісних центрів (1200,7 га), житлової забудови (391,3 га), створення зелених зон та рекреаційних просторів (98,8 га).

В останні роки в Україні реалізовано низку успішних проєктів ревіталізації промислових об'єктів, що базуються на європейському досвіді. Серед найбільш відомих можна виділити арт-завод «Платформа» (м. Київ) – створений на території колишнього шовкового комбінату; простір «Більшовик» (м. Київ) – трансформація машинобудівного заводу; креативний простір «Артем» (м. Київ); ReZavod (м. Львів) – на базі заводу

медичної апаратури; інноваційний проект «Промприлад. Реновація» (м. Івано-Франківськ).

Аналіз українського та міжнародного досвіду дозволяє виокремити три основних напрями трансформації промислових територій:

– перетворення на громадсько-ділові та торгові зони – для територій з вигідним розташуванням поблизу магістралей загальноміського значення або транспортних вузлів (бізнес-центри, торговельно-розважальні комплекси, креативні кластери);

– перетворення на житлову забудову – за умови відповідності території санітарно-гігієнічним вимогам та відсутності значного техногенного забруднення (житлові квартали, багатофункціональні житлово-громадські комплекси);

– створення зелених та рекреаційних зон – у крупних та найкрупніших містах, де зростає рекреаційне навантаження (парки, сквери, рекреаційні простори).

З функціональної точки зору можна виділити три моделі трансформації промислових територій: збереження промислової функції (меморіальна реставрація, модернізація виробництва); часткова зміна функції (реконструкція планувальної структури зі збереженням найбільш цінних архітектурних елементів, створення музеїв індустріальної спадщини, інтеграція нових громадських об'єктів); повна зміна функції (перепрофілювання під житло, культурні чи громадські функції, екологічна рекультивация, повний демонтаж з подальшим новим використанням території).

Успішна трансформація промислових територій залежить від комплексу факторів [17]: містобудівних – розташування території, транспортна доступність, наявність інженерної інфраструктури; об'ємно-планувальних – поверховість та висота приміщень, можливості перепланування, інсоляція та природне освітлення; конструктивних – технічний стан будівель та можливість їх реконструкції; екологічних – рівень техногенного забруднення та необхідність рекультивации; естетичних – архітектурна цінність будівель та відповідність новому міському середовищу.

Ефективна реалізація проектів ревіталізації потребує чіткої нормативної бази. У країнах Європи система регулювання почала формуватися ще у другій половині ХХ ст. Сьогодні ключовими документами є Лейпцизька Хартія про сталі європейські міста (2007) та її оновлена версія (2020), що запровадили концепцію інтегрованого міського розвитку та концепцію «трансформаційної сили міст» для загального блага; Європейський кліматичний закон (2021), що закріпив мету кліматичної нейтральності до 2050 р.; EU Nature Restoration Law (2024) – юридично обов'язковий акт, що вимагає збільшення площі міських зелених насаджень; Davos Baukultur System та Новий Європейський Баухауз, які визначають вимоги до проектів ревіталізації як одночасно

сталих, естетичних та інклюзивних. В Україні система нормативного регулювання цих процесів лише формується та потребує подальшого розвитку.

Висновки

Системний аналіз концептуальних засад та міжнародного досвіду засвідчив, що ревіталізація промислових і депресивних територій є комплексним інструментом сталого розвитку міст, який інтегрує економічну, соціальну, екологічну та просторову складові, а застосування класифікаційної моделі браунфілдів А–В–С дозволяє диференційовано визначати джерела фінансування проєктів – від ринкових механізмів до державної підтримки. Виокремлено три пріоритетні напрями трансформації промислових територій українських міст – створення громадсько-ділових зон, житлової забудови та рекреаційних просторів – реалізація яких потребує комплексного врахування містобудівних, об'ємно-планувальних, конструктивних, екологічних та естетичних чинників.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Biloshytska N., Tatarchenko H., Biloshytskyi M., Matliak D. (2023). Revitalizatsiia promyslovykh ob'ektiv: istoriia, osnovni pryntsyipy ta pryomy. *Prostorovyi rozvytok*. 4, 76–94. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.4.76-94>
2. New Urban Agenda. Habitat III. United Nations, 2017. URL: <https://habitat3.org/the-new-urban-agenda/>
3. Rethinking Urban Sprawl: Moving Towards Sustainable Cities. OECD Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1787/9789264189881-en>
4. Roberts P., Sykes H. *Urban Regeneration: A Handbook*. London: SAGE Publications, 2000. 320 p. ISBN 978-0761967163.
5. Colantonio A., Dixon T. (2011). *Urban Regeneration and Social Sustainability: Best Practice from European Cities*. Oxford: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444329445.ch2>

6. He D., Zainol R., Azali N.S. (2024). A systematic literature review of brownfield sustainability: Dimensions, indicators, and stakeholders. *Heliyon*. 10, e38998. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38998>
7. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. UN General Assembly Resolution A/RES/70/1, 2015. 41 p.
8. Zheng B., Masrabaye F. (2023). Sustainable brownfield redevelopment and planning: Bibliometric and visual analysis. *Heliyon*. 26;9(2):e13280. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13280>
9. Dulić O., Krklješ M. Brownfield Redevelopment as a Strategy for Preventing Urban Sprawl. *ResearchGate*. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/281651820_Brownfield_Redevelopment_as_a_Strategy_for_Preventing_Urban_Sprawl/stats
10. Abed A., Yakhlef M. (2020). Brownfield Regeneration as a Strategy for Sustainable Development: Amman Case Study. *International Journal of Technology*. 11(4), 732-742.
11. Zhuk O. Revitalizatsiia mist: kompleksnyi protses vidnovlennia urbanizovanykh terytorii. 2024. *ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/377534491_Revitalizacia_mist
12. Horbliuk S. (2020). Revitalizatsiia mista: sutnist ta kliuchovi kharakterystyky. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii derzhavnoho upravlinnia pry Prezydentovi Ukrainy. 2, 34-41. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnadu_2020_2_6
13. Ferber U., Grimski D., Millar K., Nathanail P. (2006). Sustainable Brownfield Regeneration: CABERNET Network Report. Nottingham: University of Nottingham. 134.
14. Tatarchenko H., Porkuiian S., Biloshytska N., Chorni Y. (2025). Systema otsinky nerukhomosti v Ukraini: perspektyvy ta zahrozy. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. 90, 396–407. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.90.396-407>
15. Bronevitskyi A. P. Reorhanizatsiia promyslovykh terytorii krupnykh mist Ukrainy: monohrafiia. Kyiv: KNUBA, 2018. 248 s.
16. Heneralnyi plan rozvytku m. Kyieva do 2025 r. Kyivska miska derzhavna administratsiia, 2020. URL: <https://kga.gov.ua/genplan>
17. Biloshytska N., Tatarchenko Z., Reveka A., Lobko D. (2022). Analiz suchasnykh metodiv provedennia tekhnichnoho obstezhennia budivel ta sporud. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. 79, 45–56. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.79.45-56>.

Література

1. Білошицька Н., Тагарченко Г., Білошицький М., Матляк Д. (2023). Ревіталізація промислових об'єктів: історія, основні принципи та прийоми. *Просторовий розвиток*. 4, 76–94. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.4.76-94>
2. New Urban Agenda. Habitat III. United Nations, 2017. URL: <https://habitat3.org/the-new-urban-agenda/>
3. Rethinking Urban Sprawl: Moving Towards Sustainable Cities. OECD Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1787/9789264189881-en>
4. Roberts P., Sykes H. Urban Regeneration: A Handbook. London: SAGE Publications, 2000. 320. ISBN 978-0761967163.
5. Colantonio A., Dixon T. (2011). Urban Regeneration and Social Sustainability: Best Practice from European Cities. Oxford: Wiley-Blackwell <https://doi.org/10.1002/9781444329445.ch2>

6. He D., Zainol R., Azali N.S. (2024). A systematic literature review of brownfield sustainability: Dimensions, indicators, and stakeholders. *Heliyon*. 10, e38998. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38998>
7. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. UN General Assembly Resolution A/RES/70/1, 2015. 41.
8. Zheng B., Masrabaye F. (2023). Sustainable brownfield redevelopment and planning: Bibliometric and visual analysis. *Heliyon*. 26;9(2):e13280. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13280>
9. Dulić O., Krklješ M. Brownfield Redevelopment as a Strategy for Preventing Urban Sprawl. *ResearchGate*. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/281651820_Brownfield_Redevelopment_as_a_Strategy_for_Preventing_Urban_Sprawl/stats
10. Abed A., Yakhlef M. (2020). Brownfield Regeneration as a Strategy for Sustainable Development: Amman Case Study. *International Journal of Technology*. 11(4), 732-742.
11. Жук О. Ревіталізація міст: комплексний процес відновлення урбанізованих територій. 2024. *ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/377534491_Revitalizacia_mist
12. Горблюк С. (2020). Ревіталізація міста: сутність та ключові характеристики. Збірник наукових праць Національної академії державного управління при Президентові України. 2, 34–41. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnadu_2020_2_6
13. Ferber U., Grimski D., Millar K., Nathanail P. (2006). Sustainable Brownfield Regeneration: CABERNET Network Report. Nottingham: University of Nottingham, 134 p.
14. Татарченко Г., Поркуян С., Білошицька Н., Чорний Є. (2025). Система оцінки нерухомості в Україні: перспективи та загрози. Містобудування та територіальне планування. 90, 396–407. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.90.396-407>
15. Броневицький А. П. Реорганізація промислових територій крупних міст України: монографія. Київ: КНУБА, 2018. 248 с.
16. Генеральний план розвитку м. Києва до 2025 р. Київська міська державна адміністрація, 2020. URL: <https://kga.gov.ua/genplan>
17. Білошицька Н., Татарченко З., Ревека А., Лобко Д. (2022). Аналіз сучасних методів проведення технічного обстеження будівель та споруд. Містобудування та територіальне планування. 79, 45–56. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.79.45-56>.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 13.05.2026	Received 13.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 15.05.2026	Received in revised form 15.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

N. Biloshytska*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-2885>

M. Biloshytskyi

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9935-4161>

P. Uvarov

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3310-5719>

Department of civil engineering, urbanism and spatial planning

*corresponding author, e-mail: beloshitska@snu.edu.ua

Conceptual Foundations and Directions of Revitalisation of Industrial and Depressed Areas of Ukrainian Cities in the Context of Sustainable Development

How to Cite:

Biloshytska, N., Biloshytskyi, M., Uvarov, P. (2026). Conceptual Foundations and Directions of Revitalisation of Industrial and Depressed Areas of Ukrainian Cities in the Context of Sustainable Development. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, 25, 165-177. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-13](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-13)

The article examines the conceptual foundations of revitalization of industrial and depressed territories as a complex process of transforming obsolete urban spaces and a tool for the sustainable development of modern cities. Historical preconditions for the emergence of brownfields and depressed areas are analysed, and international experience of EU countries (Germany, France, the Netherlands), Great Britain, Canada and Japan in overcoming territorial depression is summarised. The classification of brownfields according to the A-B-C model (self-developing, potential development, undeveloped) is systematised, and the economic feasibility of revitalization for each category is substantiated: A-sites do not require state funding; B-sites require partial state support or tax preferences; C-sites are revitalised mainly with state funding for environmental and safety reasons. Four key components of revitalization are identified: economic (restoration of investment attractiveness), social (integration of citizens, creation of public spaces), ecological (cleaning of the environment, nature-based solutions) and spatial (changing the structure of territory use). The main directions of transformation of industrial territories in Ukraine are determined: conversion into public-business zones (business centres, shopping malls, creative clusters), residential development (subject to compliance with sanitary and hygienic requirements) and recreational spaces (parks, squares, public spaces). Three functional models of transformation are also distinguished: preservation of the industrial function, partial change of function and complete change of function. Ukrainian examples of revitalization (Platforma art-factory, Bilshovyk space, Artem creative space, ReZavod, Promprylad. Renovation) are considered. Based on the analysis of the structure of land use of Kyiv, the potential of industrial territory revitalization (≈ 6.9 thousand hectares, or 7.9-8% of the city area) is estimated, and a comparison with the structure of land use of Berlin, Warsaw and Paris is made. A list of urban planning, volumetric-planning, structural, ecological and aesthetic factors of successful implementation of revitalization projects is formulated. The further development of revitalization processes in Ukraine requires the improvement of the regulatory framework harmonised with European standards (Leipzig Charter, EU Nature Restoration Law, Davos Baukultur System, New European Bauhaus) and the formation of effective public-private partnership mechanisms.

Keywords: revitalization, brownfields, depressed territories, reconstruction, sustainable development, urban planning.

УДК 504.064.3:528.8:553.97

В.Л. Расюн

старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2053-7561>

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, проспект Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

О. В. Мельник*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5429-4038>

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, проспект Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

В.Ф. Радзій

к.г.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8757-4944>

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, проспект Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

*автор-кореспондент, e-mail: hockins@vnu.edu.ua

Інтеграція даних Sentinel-2 та платформи Google Earth Engine для просторово-часового моніторингу територій торфовидобутку

Цитувати як:

Расюн, В.Л., Мельник, О. В., Радзій, В.Ф. (2026) Інтеграція даних Sentinel-2 та платформи Google Earth Engine для просторово-часового моніторингу територій торфовидобутку. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 178-196. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-14](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-14)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У представленому дослідженні здійснено комплексний просторово-часовий аналіз екологічної трансформації та динаміки рослинного покриву родовища торфу "Коза-Березина" (Волинська область, Україна) під впливом антропогенного навантаження. З огляду на інтенсивне промислове освоєння торфовиць Українського Полісся, що неминуче супроводжується докорінною зміною гідрологічного режиму, деградацією природних біотопів, утворенням пухкого шару торфової крихти та підвищенням пожежної небезпеки, надзвичайно актуалізується потреба у безперервному кросмасштабному моніторингу таких територій. Метою роботи є кількісна та просторова оцінка масштабів деградації екосистеми внаслідок відкритого видобутку торфу, а також ідентифікація процесів природного відновлення флори (вторинних суцесій) за 9-річний період (2017–2025 рр.).

Як основне джерело геопросторових даних використано багатоспектральні знімки високої просторової та часової розрізненості

супутникової місії Sentinel-2. Обробка масивів даних здійснювалася у хмарному середовищі Google Earth Engine (GEE) та ГІС QGIS. Головним біофізичним індикатором стану та об'єму фітомаси виступав нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI). Для поглибленого просторового моделювання векторів розвитку екосистеми та візуалізації переходів площ між різними класами NDVI з року в рік було застосовано аналіз потоків за допомогою Санкей-діаграми.

Результати багаторічного моніторингу свідчать про гетерогенну реакцію болотної екосистеми на антропогенне втручання. Зафіксовано жорстку просторову локалізацію осередку екологічної деградації безпосередньо в зоні кар'єру (урочище Долина), де внаслідок зняття рослинного шару показники NDVI критично впали (нижче 0,1–0,2). Аналіз динаміки переходів підтверджує, що найвищий рівень деградації та просторового розширення площ із відкритим торфом припадає на 2023–2024 роки.

Водночас, дослідження виявило високу екологічну пластичність та потужний регенеративний потенціал фонові екосистеми родовища. Встановлено, що загальний лінійний тренд значень NDVI за весь досліджуваний період залишається стабільним із позитивним нахилом. Станом на 2025 рік територіальна експансія торфорозробки припинилася. Аналіз Санкей-діаграми чітко візуалізує макростабілізацію та висхідний тренд у кінці періоду: значні площі рослинності масово перейшли до вищих класів NDVI (0,8–1,0).

Встановлено, що інтеграція відкритих мультиспектральних оптичних даних Sentinel-2, можливостей платформи GEE та методів візуалізації динаміки переходів є об'єктивним, безпечним і високоефективним підходом для екологічного контролю діючих торфородовищ, що дозволяє оптимізувати стратегії раціонального природокористування та управління водно-болотними угіддями.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), промислові торфовища, NDVI, мультиспектральні дані Sentinel-2, Google Earth Engine (GEE), динаміка рослинного покриву.

Вступ

Торфовища — це унікальні водно-болотні екосистеми, які відіграють критичну роль у підтриманні екологічного балансу, збереженні ландшафтного біорізноманіття та регулюванні глобального клімату. Вони є найважливішими природними резервуарами, де постійно накопичується та зберігається величезна кількість вуглецю у вигляді рослинних залишків, що запобігає його викидам в атмосферу. Крім екологічної цінності, торф посідає особливе місце серед природних ресурсів як надійна альтернатива традиційним паливним енергоносіям (газу та вугілля), а також є цінною сировиною для сільського господарства [1; 2]. Зважаючи на значні запаси торфу в Україні, особливо в зоні Полісся, ці території зазнають інтенсивного антропогенного навантаження через видобуток торфосировини [3].

Проте розробка та меліорація родовищ торфу супроводжуються низкою негативних наслідків. Порушення гідрологічного режиму зумовлює деградацію екосистем, зниження рівня ґрунтових вод, підсушення поверхні та втрату торфом здатності утримувати вологу. Це створює екстремальні умови для розвитку природної рослинності, призводячи до її заміни на маловидові синантропні (бур'янові) угруповання. Крім того, на меліорованих і порушених торфовищах різко підвищуються ризики виникнення довготривалих підземних пожеж, які завдають колосальних збитків довкіллю та супроводжуються викидами вуглекислого газу та інших небезпечних сполук. Саме тому функціонування діючих торфових родовищ потребує постійного екологічного моніторингу.

Оскільки торфовища часто є важкодоступними заболоченими територіями, польові дослідження стають трудомісткими та дорогавартісними. Сучасною та найефективнішою альтернативою є застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які дозволяють здійснювати кросмасштабний, оперативний та безперервний моніторинг динаміки рослинного покриву [4]. Виняткову ефективність демонструє використання даних відкритого доступу багатоспектральних знімків супутникової місії Sentinel-2 завдяки їхній високій просторовій розрізненості (10 м) та частоті зйомки, що ідеально підходить для фіксації динамічних змін. Розрахунок спектральних вегетаційних індексів, серед яких найпоширенішим є NDVI (нормалізований різницевий вегетаційний індекс), є ключовим інструментом для оцінки складу, стану та об'єму зеленої біомаси, ідентифікації меж відкритих розробок, а також фіксації етапів вторинних сукцесій під час рекультивациі або природного відновлення [5; 6].

Об'єктом дослідження є родовище торфу "Коза-Березина" (рис. 1), розташоване у межах Камінь-Каширського району Волинської області. На цій території з 2022 року функціонує діюче родовище, де ведеться активне добування торфової крихти для виробництва торфобрикету. Відповідно до екологічних умов провадження планованої діяльності, визначених у Висновку з оцінки впливу на довкілля № 21/01-20208276495/1 від 2 грудня 2021 року, погоджено видобування торфу на ділянках в урочищах Садок та Долина. Станом на теперішній час видобування торфу здійснюється в урочищі Долина. Згідно з рішеннями екологічної експертизи, у межах урочищ Робіття та Кілієв видобувна діяльність здійснюватися не буде.

Метою цього дослідження є здійснення комплексного ретроспективного та сучасного аналізу просторово-часової динаміки рослинного покриву родовища "Коза-Березина" за період з 2017 по 2025 роки [7]. Застосування масиву багатоспектральних даних Sentinel-2 та

розрахунок індексу NDVI у середовищі Google Earth Engine (GEE) дозволить об'єктивно оцінити просторові масштаби деградації екосистеми внаслідок видобутку торфу, а також дослідити тенденції природного відновлення флори (сукцесійних процесів) на прилеглих територіях.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Сучасні дослідження екосистем торфовищ все частіше спираються на методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Це зумовлено тим, що торфовища часто є важкодоступними територіями, що робить традиційні польові дослідження трудомісткими та дорогавартісними. Аналіз наукометричних баз за останні два десятиліття [1] свідчить про стрімке зростання кількості публікацій, присвячених використанню супутникових даних для моніторингу водно-болотних угідь. Цей стрибок насамперед пов'язаний із запуском європейської програми Copernicus [8] та доступністю даних супутників Sentinel-1 та Sentinel-2, які забезпечують безперервне спостереження з високою просторовою (до 10 м) та часовою (до 5 діб) розрізненістю [9].

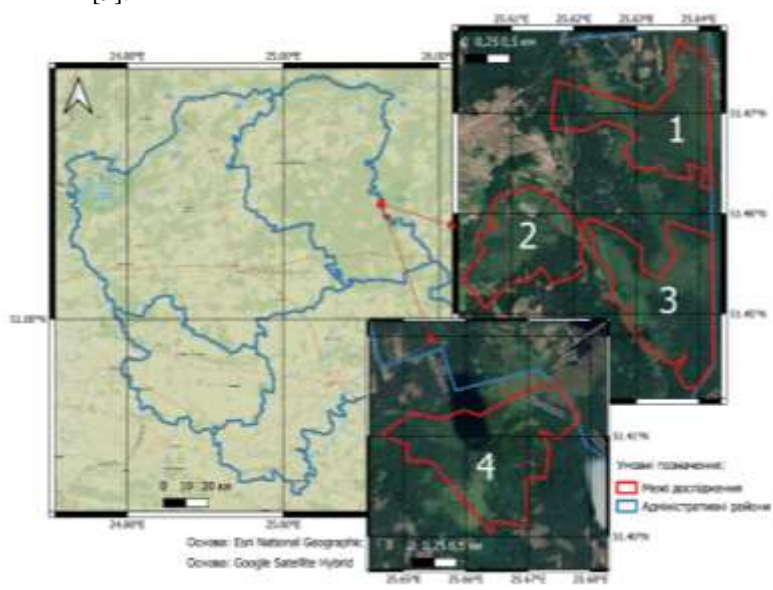


Рис. 1. Розташування промислового родовища торфу Коза-Березина (урочища: 1 – Робіття, 2 – Садок, 3 – Долина, 4 – Кілієв)

У світовій практиці дослідження торфовищ засобами ДЗЗ умовно поділяються на три основні напрями: картографування рослинності та біорізноманіття, оцінка глибини ґрунтових вод, а також моніторинг

потоків парникових газів. Для ідентифікації складу, стану та об'єму зеленої біомаси найширше застосовуються вегетаційні індекси. Найбільш популярним і часто використовуваним є нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) [5], який корелює з проективним покриттям рослинності та запасами надземної фотосинтетично-активної фітомаси. Поряд із ним для оцінки зволоженості територій та виявлення водного стресу у рослин застосовують водні індекси, такі як NDWI [6]. Останні дослідження також акцентують увагу на високій ефективності індексів "червоного краю" (наприклад, NDRE, REP) [2; 3], які є чутливими до вмісту хлорофілу і дозволяють надійно ідентифікувати межі залягання торфу навіть під шаром рослинності.

Окремим важливим вектором літератури є моніторинг деградованих та порушених торфовищ. Осушення (меліорація) та промисловий видобуток призводять до різкого зниження рівня ґрунтових вод і формування пухкого шару торфової крихти, що екстремально змінює гідрологічний та температурний режими. У таких умовах первинна рослинність деградує, і розпочинаються процеси вторинної сукцесії, які характеризуються формуванням нестабільних маловидових синантропних угруповань. Крім того, порушені торфовища є зонами підвищеної пожежної небезпеки. Супутникові дані дозволяють ефективно фіксувати площі вигорань, оцінювати ризики самозагоряння на відкритих торфовищах та моніторити процеси відновлення рослинного покриву після припинення антропогенного чи пірогенного впливу.

Постановка проблеми

Попри значну кількість теоретичних та практичних розробок у сфері ДЗЗ, локальний моніторинг діючих промислових торфовищ Українського Полісся залишається недостатньо висвітленим. Більшість українських торфовищ зазнали інтенсивного впливу ще під час масової меліорації у минулому столітті, проте сучасний промисловий видобуток формує нові, ще більш екстремальні осередки деградації.

Родовище "Коза-Березина", розташоване у Волинській області, є показовим об'єктом. Із 2022 року ця територія функціонує як діючий торфокар'єр для інтенсивного добування торфової крихти [10]. Хоча для цього об'єкта проводилися наземні дослідження флори та фауни (зокрема, еколого-географічна оцінка перед початком розробки у 2021 році), комплексного дистанційного аналізу динаміки рослинного покриву, що охоплював би періоди до початку активного видобутку та під час нього, бракує.

Отже, проблема полягає у необхідності об'єктивізації та просторової кількісної оцінки масштабів антропогенної трансформації

родовища "Коза-Березина". Для вирішення цього завдання необхідно використати часові ряди мультиспектральних супутникових знімків Sentinel-2 (через платформу GEE) за 2017–2025 роки. Розрахунок та аналіз індексу NDVI дозволить не лише точно локалізувати поточні межі відкритого видобутку торфу, але й оцінити стан зеленої біомаси на прилеглих територіях, відслідкувати темпи та напрямки сукцесійних процесів (природного відновлення), а також спрогнозувати подальший розвиток екосистеми в умовах тривалого промислового навантаження.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є комплексне оцінювання просторово-часової динаміки стану рослинного покриву та екологічної трансформації родовища торфу "Коза-Березина" під впливом видобутку торфу з використанням мультиспектральних даних дистанційного зондування Землі (супутникової місії Sentinel-2) та вегетаційного індексу NDVI за період 2017–2025 років.

Дане дослідження потребує виконання наступних завдань:

1. Здійснити ретроспективний та поточний аналіз багатоспектральних знімків Sentinel-2 за вегетаційні періоди 2017–2025 років, застосовуючи інструменти хмарної платформи Google Earth Engine (GEE) та ГІС-середовища QGIS.
2. Розрахувати значення нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) для кількісної та якісної діагностики стану фітомаси на всій території родовища та здійснити класифікацію територій за ступенем розвитку рослинності.
3. Закартографувати межі територій з повністю деградованим рослинним покривом, де безпосередньо здійснюється видобуток торфосировини (урочище Долина), та проаналізувати зміну їхньої площі з моменту початку розробки кар'єру у 2022 році.
4. Оцінити стан збереженості рослинного покриву та відслідкувати темпи природного відновлення на ділянках, що не зазнають прямого впливу видобутку, зокрема в урочищах Робіття, Кілієв та Садок.
5. Підтвердити ефективність інтеграції мультиспектральних супутникових даних для оперативного та довгострокового екологічного моніторингу діючих промислових торфовищ та оцінки їхнього біорізноманіття.

Матеріали та методи

Для виконання поставлених завдань щодо оцінки стану рослинного покриву та просторової динаміки торфового родовища "Коза-Березина" було застосовано комплекс методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Основним джерелом просторових даних стали багатоспектральні супутникові знімки європейської місії Sentinel-2 (апарати Sentinel-2A та Sentinel-2B) [11], що реалізується в рамках програми спостереження за Землею Copernicus. Вибір цієї платформи зумовлений високою періодичністю зйомки (інтервал становить до 5 діб) та високою просторовою розрізненістю багатоспектрального сенсора MSI (до 10 метрів для видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів), що робить ці дані оптимальними для детального моніторингу динамічних змін екосистем.

Пошук, доступ та первинний відбір супутникових знімків здійснювалися за допомогою хмарної платформи геопросторового аналізу Google Earth Engine (GEE). Для забезпечення високої точності аналізу використовувався набір даних гармонізованих значень поверхневого відбиття (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) за вегетаційні періоди 2017–2025 років. Для виявлення просторово-часових трендів змін стану рослинності відбиралися зображення з відсотком покриття хмарами не більше 5–10%.

Ключовим інструментом для оцінки якості, густоти та стану рослинності на торфовищі є нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI — Normalized Difference Vegetation Index) (1) [12–14]. Розрахунок цього індексу базується на вимірюванні відбивальної здатності рослинного покриву у двох ділянках електромагнітного спектра згідно з формулою:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

де *NIR* — значення відбиття у ближньому інфрачервоному спектрі, а *RED* — інтенсивність відбиття у червоному діапазоні спектра.

Принцип дії NDVI ґрунтується на двох найбільш стабільних фізико-хімічних характеристиках рослинності. У червоній зоні спектру (0,62–0,75 мкм) зелені рослини поглинають максимум сонячної радіації, оскільки вона використовується хлорофілом у процесі фотосинтезу. Водночас клітинна структура листя відображає максимальну кількість енергії у ближній інфрачервоній зоні (0,75–1,3 мкм). Відтак, висока фотосинтетична активність, притаманна здоровій та густій рослинності, призводить до малого відбиття світла в червоній зоні і потужного відбиття в інфрачервоній. Таке співвідношення дозволяє чітко розпізнавати зелену фітомасу та відокремлювати її від інших поверхонь (відкритого ґрунту, торфу, води тощо).

Значення індексу NDVI варіюють у межах від -1 до +1. Для точної ідентифікації зон впливу промислового видобутку та фіксації процесів відновлення фітомаси в урочищах родовища "Коза-Березина" нами застосована така класифікаційна шкала значень, що адаптована до специфічних умов видобутку торфу:

0,0 – 0,2 — відсутність біомаси (характерно для зон з відкритим торфом або голим ґрунтом).

0,2 – 0,3 — низький ступінь розвитку біомаси (початкові стадії розвитку рослинності або слабкий покрив).

0,3 – 0,6 — середній ступінь розвитку біомаси (чагарники, рідколіся, ділянки в процесі сукцесії).

0,6 – 1,0 — високий ступінь розвитку біомаси (густа, здорова та зімкнена лісова або водно-болотна рослинність).

Результати та обговорення

Комплексний аналіз мультиспектральних супутникових знімків Sentinel-2 (у середовищі GEE) за 2017–2025 роки дозволив відслідкувати просторово-часову динаміку рослинного покриву родовища "Коза-Березина" та об'єктивно оцінити масштаби його екологічної трансформації в умовах антропогенного навантаження (рис. 2).

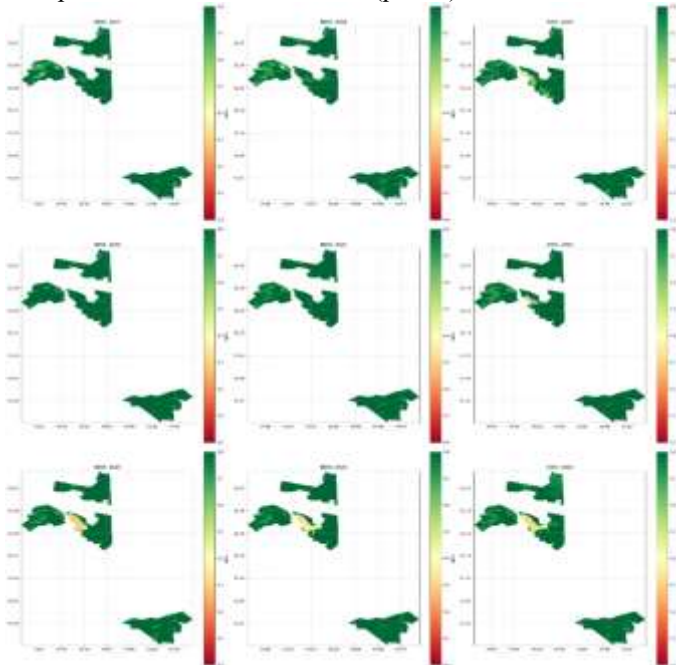


Рис. 2. Динаміка рослинного покриття за індексом NDVI за 2017–2025 роки.

Аналіз графіка часових рядів значень NDVI для всієї території родовища (рис. 3) демонструє чітко виражену синусоїдальну циклічність, що відповідає природним сезонним (фенологічним) змінам рослинності.

Мінімальні значення індексу фіксуються у зимово-весняний період, опускаючись до показників 0,1–0,2, тоді як пікові значення, що свідчать про максимальне накопичення зеленої біомаси, припадають на літні місяці (червень-липень) і досягають рівня 0,8–0,9.

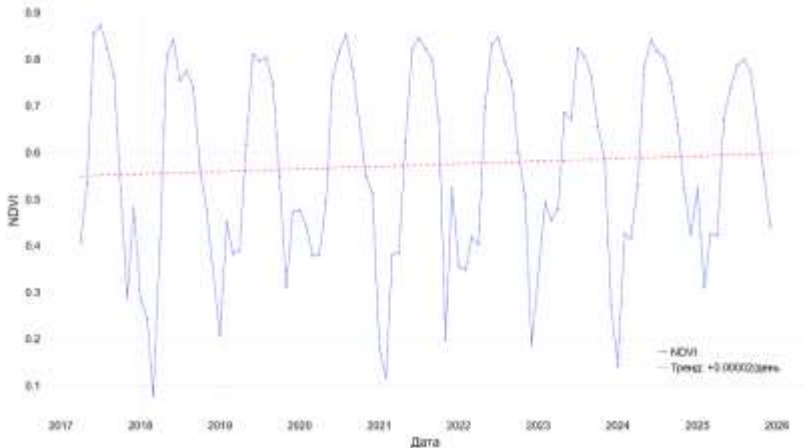


Рис. 3. Графік часових рядів значень NDVI

Незважаючи на те, що на території родовища (зокрема в урочищі Долина) з 2022 року ведеться активний промисловий видобуток торфу, загальний багаторічний лінійний тренд значень NDVI залишається стабільним із мінімальним позитивним нахилом (+0,00002/день). Це свідчить про те, що загальна площа непорушених або відновлюваних біотопів (зокрема в ур. Робіття, Кілієв, Садок) компенсує втрату біомаси на ділянці безпосереднього кар'єру.

Детальний аналіз діаграм розподілу площ за класами вегетаційного індексу з кроком значень 0,1 виявляє неоднорідність реакції екосистеми в різні роки (рис. 4, табл. 1).

Протягом усього досліджуваного періоду домінуючими залишаються класи з високими значеннями NDVI (0,7–1,0), що відповідають ділянкам із густою деревно-чагарниковою та водно-болотною рослинністю.

Водночас фіксуються значні міжрічні флуктуації, обумовлені сукупною дією антропогенних і гідрометеорологічних чинників:

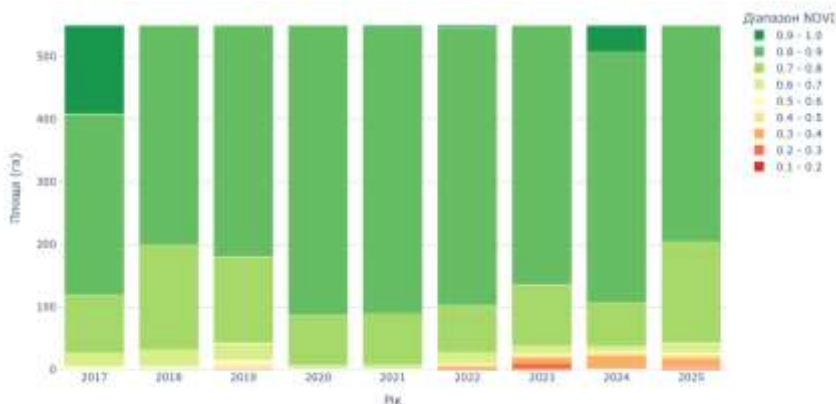


Рис. 4. Розподіл площ за класами NDVI

Таблиця 1. Розподіл площ за значенням NDVI, га

Рік	0.0–0.2 (Відсутність)	0.2–0.3 (Низький)	0.3–0.6 (Середній)	0.6–1.0 (Високий)
2017	—	—	26.73	523.58
2018	0.02	0.38	30.86	519.06
2019	0.12	2.46	40.80	506.94
2020	—	—	6.46	543.85
2021	—	—	8.37	541.94
2022	2.01	2.71	22.41	523.18
2023	9.95	10.53	17.65	512.17
2024	0.72	22.43	15.14	512.02
2025	4.13	14.08	25.14	506.96

- У 2019 році в урочищі Долина зафіксовано погіршення стану рослинного покриву, що проявлялося у формуванні ділянок із низькими значеннями NDVI (0,2–0,6), пов’язаними з пірогенним ураженням території. Упродовж наступних років, до 2022 року включно, на торфовищах, уражених пожежею, відбувалося відновлення піонерної рослинності, що супроводжувалося зростанням значень NDVI до рівня 0,7–0,9.
- У 2024 році встановлено негативну динаміку стану рослинного покриву відносно попередніх періодів. За результатами аналізу NDVI значні території характеризуються значеннями індексу в

межах 0,3–0,5, а в зоні активного відкритого видобутку торфу (урочище Долина) — нижче 0,1. Виявлені тенденції обумовлені інтенсифікацією видобутку, дефіцитом атмосферних опадів та зниженням рівнів ґрунтових вод унаслідок розвитку міжкартової дренажної мережі.

- У 2025 році ситуація стабілізувалася. Площа безпосереднього видобування відкритого торфу (із показниками NDVI 0,0–0,6) припинила своє розширення. Водночас, в урочищах Робіття та Кілієв спостерігалось покращення стану фітомаси: завдяки кращій забезпеченості атмосферними опадами та сприятливому температурному режиму, значно зросла площа територій із високими показниками індексу (0,6–0,9). Стан рослинності поза кар'єром у 2025 році оцінюється як добрий.

Для просторової локалізації екологічної трансформації було побудовано карту різниці значень NDVI між кінцевим (2025) та початковим (2017) роками дослідження (рис. 5). Карта наочно демонструє два протилежні процеси:

1. У центральній частині масиву (урочище Долина) сформувалася велика суцільна ділянка різкого погіршення показників NDVI (відмічена темно-червоним кольором). Ця аномалія ідеально збігається з контурами діючого торфокар'єру.
2. На периферії родовища, а також поблизу меліоративних каналів, фіксуються ділянки з позитивною динамікою індексу (зелені кольори на карті). Це є прямим індикатором розростання деревно-чагарникової рослинності.

Дистанційно зафіксована просторова картина повністю корелює з результатами наземних екологічних обстежень біорізноманіття [7]. Різке падіння NDVI в урочищі Долина зумовлене не лише поточним зняттям рослинного шару для видобутку торфової крихти, але й наслідками масштабних підземних пожеж, які вирували тут кілька років до початку активної розробки (2018-2019 рр.) і повністю знищили кореневі системи дерев.

Промислова діяльність сформувала на родовищі екстремальний едафо-гідрологічний режим, зокрема відбулося різке пониження рівня ґрунтових вод, утворився пухкий шар торфу, нездатний утримувати вологу, підвищилася аерація кореневого шару. У таких умовах на відкритих ділянках кар'єру фіксується уповільнений розвиток сукцесій та формування виключно маловидових синантропних (бур'янових) угруповань з домінуванням терофітів, які утворюють нестабільні монодомінантні парцели. Відповідно, такі ділянки на супутникових

знімках класифікуються як зони з низьким рівнем розвитку біомаси ($NDVI < 0,6$).

Разом з тим, позитивний багаторічний тренд NDVI пояснюється активними процесами вторинної сукцесії на ділянках, що не зазнають прямого руйнівного впливу, зокрема вздовж численних меліоративних каналів. Завдяки кращій зволоженості там формується стійка багатоярусна рослинність, що складається з різних видів верб, вільхи чорної, берези та осики. Ці зони виступають своєрідними екологічними коридорами та джерелами насіння для поступового природного відновлення порушених земель родовища.

Для більш глибокого розуміння еволюції рослинного покриву та відслідковування того, як саме трансформувалися конкретні ділянки з року в рік, було проаналізовано дані динаміки змін за допомогою Санкей-діаграми (рис. 6). Цей інструмент дозволяє візуалізувати "потоки" площ, що переходять з одного класу вегетаційного індексу в інший протягом 2017–2025 років.

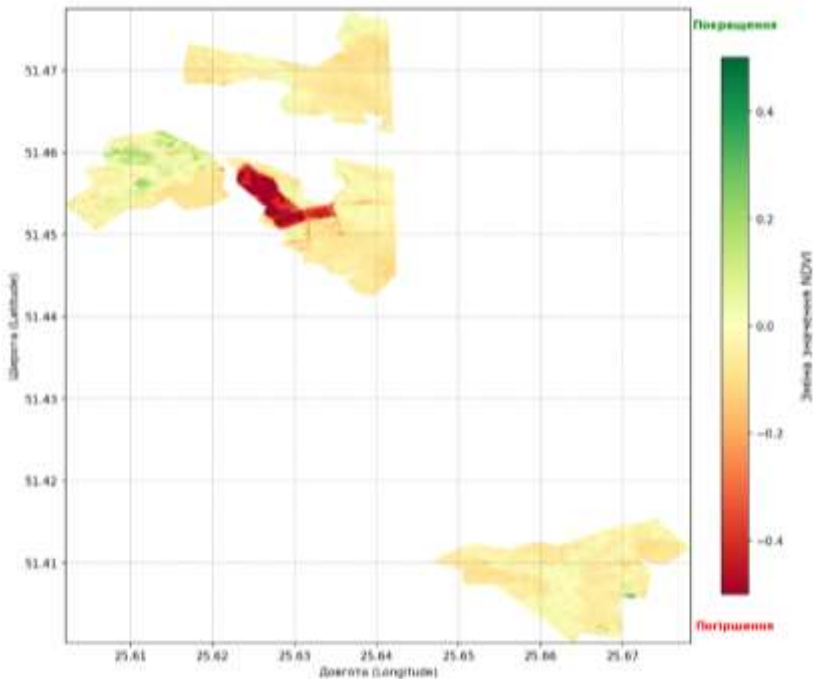


Рис. 5. Динаміка змін індексу NDVI за 2017-2025 роки

Аналіз потоків на діаграмі дозволяє виявити кілька ключових закономірностей:

По-перше, протягом усього 9-річного періоду найпотужніші потоки зосереджені у верхній частині діаграми і відображають збереження високих показників біомаси (класи 0,7–0,8, 0,8–0,9 та 0,9–1,0). Переходи між цими класами здебільшого мають горизонтальний характер або незначно коливаються під впливом сезонних метеорологічних умов. Це свідчить про високу екологічну стабільність периферійних ділянок родовища (урочища Робіття, Кілієв), де рослинність залишається густою та продуктивною.

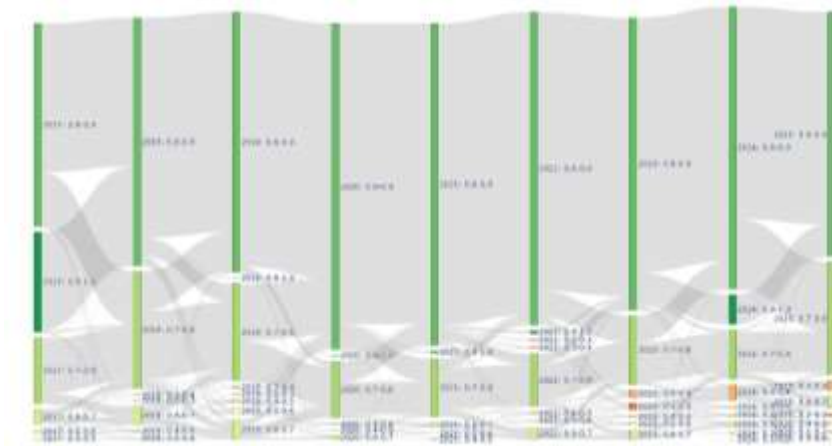


Рис. 6. Санкей-діаграма трансформації територій за класами індексу NDVI

По-друге, починаючи з 2022 року, на діаграмі чітко формуються нові, спадні потоки. Частина площ, які раніше належали до класів із задовільним розвитком біомаси, різко "перетікає" у нижні спектри діаграми — класи 0,3–0,4, 0,2–0,3 та критичний 0,1–0,2. Найбільш вираженим цей низхідний тренд стає у 2023 та 2024 роках, що ідеально корелює з періодом розширення площі відкритого видобутку торфу в урочищі Долина, де показники NDVI впали нижче 0,1.

По-третє, переходи між 2024 та 2025 роками на Санкей-діаграмі демонструють позитивні зміни. По-перше, припиняється розширення потоків до найнижчого класу (0,1–0,2), що підтверджує зупинку територіальної експансії діючого кар'єру. По-друге, спостерігається потужний висхідний потік: значна частка площ, що у 2024 році перебували у класі 0,7–0,8, у 2025 році масово перейшла до вищого класу 0,8–0,9. Цей

макроперехід пояснюється кращою забезпеченістю атмосферними опадами у 2025 році, що стимулювало активний ріст зеленої біомаси на збережених та відновлюваних ділянках родовища.

Висновки

Застосування багатоспектральних супутникових даних місії Sentinel-2, розрахунок вегетаційного індексу NDVI та інструментів моделювання динаміки переходів (Санкей-діаграми) довело свою високу ефективність для кросмасштабного екологічного моніторингу промислових торфовищ. Інтеграція цих дистанційних методів дозволяє з високою точністю ідентифікувати межі антропогенного втручання, оцінювати ступінь деградації та кількісно відслідковувати напрямки еволюції рослинного покриву в умовах зміни гідрологічного режиму.

Промисловий видобуток торфу, що ведеться з 2022 року на території родовища "Коза-Березина" (зокрема, в урочищі Долина), призвів до формування жорстко локалізованого осередку деградації екосистеми. У зоні безпосередньої розробки природний рослинний покрив повністю знищено, що підтверджується падінням значень NDVI до критичних показників (нижче 0,1–0,2). Відкритий видобуток сформував екстремальні едафо-гідрологічні умови (пониження рівня ґрунтових вод, утворення сухої торфової крихти), що суттєво гальмують процеси відновлення та сприяють розвитку переважно маловидових синантропних угруповань.

Аналіз динаміки переходів площ між класами NDVI засвідчив макростабілізацію екологічної ситуації станом на 2025 рік. Територіальна експансія відкритого кар'єру припинилася, про що свідчить зупинка низхідних перетоків до найнижчих класів вегетаційного індексу. Водночас, завдяки сприятливим гідрометеорологічним умовам (краща забезпеченість атмосферними опадами), у 2025 році зафіксовано потужний висхідний тренд — масовий перехід площ із середніх класів розвитку біомаси до найвищих (NDVI 0,8–1,0).

Незважаючи на появу діючого кар'єру, загальний багаторічний тренд динаміки рослинного покриву родовища (2017–2025 рр.) залишається стабільним із мінімальним позитивним вектором. Це доводить високу екологічну пластичність та стійкість фонові екосистеми масиву. Локальні втрати біомаси ефективно компенсуються за рахунок збереження густої фітомаси в урочищах Робіття, Кілієв та Садок, а також завдяки активним процесам вторинної сукцесії. Формування стійких деревно-чагарникових біотопів по берегах меліоративних каналів створює екологічні коридори, що сприятимуть подальшій ренатуралізації порушених земель торфовища.

Майбутні дослідження вимагають переходу від класичних мультиспектральних індексів до більш спеціалізованих. Зокрема, перспективним є ширше застосування індексів, що базуються на короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR), оскільки він є найбільш чутливим до вмісту вологи. До таких індексів належать MNDWI (модифікований водний індекс), WIW (Water in Wetlands — вода у водно-болотних угіддях), SMBWI (мультидіапазонний водний індекс Sentinel) та S2WI. Вони дозволяють з високою точністю (понад 96%) [4; 6] відокремлювати воду від змішаного рослинного покриву та відкритого ґрунту, а також фіксувати сезонну або ефемерну воду, приховану під густою рослинністю.

Радарні дані із синтезованою апертурою (SAR) С-діапазону, які надаються супутниками Sentinel-1, є незамінними завдяки здатності сигналу проникати крізь хмарність та частково крізь рослинний покрив, незалежно від погодних умов і часу доби. Перспективи застосування SAR включають оцінку глибини залягання ґрунтових вод та вологості ґрунту. Аналіз зворотного розсіювання мікрохвиль чутливо реагує на діелектричну проникність верхніх шарів ґрунту, що дозволяє дистанційно картографувати динаміку вологості.

Моніторинг рухів поверхні ("дихання болота") за допомогою методів радарної інтерферометрії (InSAR), дозволяє відстежувати міліметрові вертикальні зміщення поверхні торфовища. Це є критично важливим індикатором стабільності екосистеми, гідрологічних змін та швидкості накопичення вуглецю.

Одним із найперспективніших напрямів майбутніх досліджень є комплексна інтеграція мультиспектральних оптичних зображень (Sentinel-2) із радарними даними (Sentinel-1). Цей підхід може вирішити ключову проблему спотворення радарного сигналу під впливом структури рослинності (її густоти та фенології). Використання оптичних індексів (NDVI, NDWI тощо) для визначення характеристик рослинного покриву дозволяє коригувати радарний сигнал, завдяки чому можна значно точніше моделювати вміст вологи в ґрунті. Така синергія може забезпечити отримання додаткової інформації про поверхневу вологість, площі затоплень та структуру фітомаси, що дозволить вивести якість класифікації та прогнозування змін у водно-болотних екосистемах на принципово новий рівень.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося протягом 2021-2025 років на замовлення Комунального підприємства «Волиньприродресурс» Волинської обласної ради в рамках виконання науково-дослідної роботи "Польові дослідження флори, фауни та біорізноманіття, оселищ, міграція на території планованої діяльності "Видобування торфу на родовищі "Коза-Березина"" та науково-дослідної роботи за темою "Обстеження території в межах спецдозволів з розробки запасів категорії С2 бурштиноносних ділянок – Маневицька-1, Маневицька-2, Камінь-Каширська-1, Камінь-Каширська-2; та території родовищ торфу – Велике Багно, Велике Болото, Коза-Березина, Стобихівське".

Доступність даних

Усі дані представлені в основному тексті статті у цифровій і графічній формах.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Rasiun, V., Voloshin, V., Rudyk, O., et al. A Study on the Use of Remote Sensing Methods for Monitoring and Mapping Peatlands. *Modern Achievements in Geodetic Science and Production: Collection of Scientific Papers*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2025. No. 1(49). pp. 201–211.
2. Lyalko V.I., Dugin S.S., Sybirtseva O.M., et al. On the possibility of identifying peatland features using remote sensing data. *Geological Journal*. 2023. № 4. С. 61—78. DOI: 10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929.
3. Lischenko L., Shevchuk R., Filipovich V. The technique for satellite monitoring of peatlands in order to determinate their fire hazard and combustion risks. *Ukrainian journal of remote sensing*. 2022. Т. 9, № 1. С. 16—25. DOI: 10.36023/ujrs.2022.9.1.210.
4. Czapiewski S., Szumińska D. An Overview of Remote Sensing Data Applications in Peatland Research Based on Works from the Period 2010–2021. *Land*. 2021. Т. 11, № 1. С. 24. DOI: 10.3390/land11010024.
5. Melnyk O., Brunn A. Analysis of Spectral Index Interrelationships for Vegetation Condition Assessment on the Example of Wetlands in Volyn Polissya, Ukraine. *Earth (Switzerland)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. Т. 6, № 2. DOI: 10.3390/earth6020028.
6. Melnyk O., Brunn A. Seasonal and Long-Term Water Regime Trends of Cheremsky Wetland: Analysis Based on Sentinel-2 Spectral Indices and Composite Indicator Development. *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. Т. 17, № 14. DOI: 10.3390/rs17142363.
7. Radzii V.F., Kotsun L.O., Melnyk O.V., Sukhomlin K.B. Field studies of flora, fauna, and biodiversity, habitats, and migration in the area of the planned "Peat extraction at the Kozha-Berezina deposit" project. Lutsk: Lesya Ukrainka Volyn National University, 2021. 111 pp.

8. European Space Agency. Sentinel Online - ESA [Електронний ресурс]. European Space Agency - Earth Online. 2020.
9. Reynolds N., Mota B., Nightingale J.M. Open-access satellite data for peatland condition and restoration monitoring in the UK: a review. *Frontiers in Environmental Science*. 2025. T. Volume 13-2025. DOI: 10.3389/fenvs.2025.1685165.
10. Boiaryn M., Nekos A., Radzii V., et al. Impact of peat extraction from the peatlands of upper Pripyat basin on the environment. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*. 2025. № 62. С. 401—411. DOI: 10.26565/2410-7360-2025-62-30.
11. Gatti A., Naud C., Castellani C., Carriero F. Sentinel-2 Products Specification Document. *Thales Alenia Space*. 2018.
12. Gandhi G.M., Parthiban S., Thummalu N., Christy A. NDVI: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*. 2015. T. 57. С. 1199—1210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>.
13. Valor E., Environment V.C.-R. sensing of, 1996 undefined. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Elsevier*. 1995. T. 57. С. 167—184.
14. Zheng Y., Han J., Huang Y., et al. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China. *Ecological Indicators*. 2018. T. 92. С. 18—29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.040>.

Література

1. Расюн, В., Волошин В., Рудик, О., та ін. Дослідження використання методів ДЗЗ для моніторингу та картографування торфовищ. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: збірник наукових праць*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2025. № 1(49). С. 201—211.
2. Lyalko V.I., Dugin S.S., Sybirtseva O.M., та ін. On the possibility of identifying peatland features using remote sensing data. *Geological Journal*. 2023. № 4. С. 61—78. DOI: 10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929.
3. Lischenko L., Shevchuk R., Filipovich V. The technique for satellite monitoring of peatlands in order to determinate their fire hazard and combustion risks. *Ukrainian journal of remote sensing*. 2022. T. 9, № 1. С. 16—25. DOI: 10.36023/ujrs.2022.9.1.210.
4. Czapiewski S., Szumińska D. An Overview of Remote Sensing Data Applications in Peatland Research Based on Works from the Period 2010–2021. *Land*. 2021. T. 11, № 1. С. 24. DOI: 10.3390/land11010024.
5. Melnyk O., Brunn A. Analysis of Spectral Index Interrelationships for Vegetation Condition Assessment on the Example of Wetlands in Volyn Polissya, Ukraine. *Earth (Switzerland)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. T. 6, № 2. DOI: 10.3390/earth6020028.
6. Melnyk O., Brunn A. Seasonal and Long-Term Water Regime Trends of Cheremsky Wetland: Analysis Based on Sentinel-2 Spectral Indices and Composite Indicator Development. *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. T. 17, № 14. DOI: 10.3390/rs17142363.
7. Радзій В.Ф., Коцун Л.О., Мельник О.В., Сухомлін К.Б. Польові дослідження флори, фауни та біорізноманіття, оселищ, міграція на території

планованої діяльності «Видобування торфу на родовищі «Коза-Березина». Луцьк: Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2021. 111 с.

8. European Space Agency. Sentinel Online - ESA [Електронний ресурс]. European Space Agency - Earth Online. 2020.

9. Reynolds N., Mota B., Nightingale J.M. Open-access satellite data for peatland condition and restoration monitoring in the UK: a review. *Frontiers in Environmental Science*. 2025. Т. Volume 13-2025. DOI: 10.3389/fenvs.2025.1685165.

10. Boiaryn M., Nekos A., Radzii V., та ін. Impact of peat extraction from the peatlands of upper Pripyat basin on the environment. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*. 2025. № 62. С. 401—411. DOI: 10.26565/2410-7360-2025-62-30.

11. Gatti A., Naud C., Castellani C., Carriero F. Sentinel-2 Products Specification Document. *Thales Alenia Space*. 2018.

12. Gandhi G.M., Parthiban S., Thummalu N., Christy A. Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*. 2015. Т. 57. С. 1199—1210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>.

13. Valor E., Environment V.C.-R. sensing of, 1996 undefined. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Elsevier*. 1995. Т. 57. С. 167—184.

14. Zheng Y., Han J., Huang Y., та ін. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China. *Ecological Indicators*. 2018. Т. 92. С. 18—29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.040>.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.05.2026	Received 12.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 15.05.2026	Received in revised form 15.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

V. L. Rasiun

Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2053-7561>

Department of Geodesy, Land Management, and Cadastre

Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volia Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

O. V. Melnyk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5429-4038>

Department of Geodesy, Land Management, and Cadastre

Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volia Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

V.F. Radzii

Ph.D. in Geography, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8757-4944>

Department of Geodesy, Land Management, and Cadastre

Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volia Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

*corresponding author, e-mail: hockins@vnu.edu.ua

Integration of Sentinel-2 data and the Google Earth Engine platform for spatiotemporal monitoring of peat extraction locations

How to Cite:

Rasiun V.L., Melnyk O.V., Radzii V.F. (2026). Integration of Sentinel-2 data and the Google Earth Engine platform for spatiotemporal monitoring of peat extraction locations. *Modern technologies and calculation methods in construction.*, 25, 178-196. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-14](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-14)

Abstract. This study presents a comprehensive spatiotemporal analysis of the ecological transformation and dynamics of the vegetation cover at the “Koz-Berezina” peat deposit (Volyn Oblast, Ukraine) under the influence of anthropogenic pressure. Given the intensive industrial exploitation of peatlands in the Ukrainian Polissya, which is inevitably accompanied by a radical change in the hydrological regime, degradation of natural habitats, the formation of a loose layer of peat crumbs, and an increased fire hazard, the need for continuous cross-scale monitoring of such areas has become extremely urgent. The aim of this study is to quantitatively and spatially assess the extent of ecosystem devastation resulting from open-pit peat extraction, as well as to identify processes of natural flora recovery (secondary succession) over a 9-year period (2017–2025).

Multispectral images with high spatial and temporal resolution from the Sentinel-2 satellite mission were used as the primary source of geospatial data. Data processing was performed in the Google Earth Engine (GEE) cloud environment and GIS QGIS. The normalized difference vegetation index (NDVI) served as the primary biophysical indicator of the state and volume of phytomass. For in-depth spatial modeling of ecosystem development vectors and visualization of area transitions between different NDVI classes from year to year, flow analysis using a Sankey diagram was applied.

The results of long-term monitoring indicate a heterogeneous response of the wetland ecosystem to anthropogenic intervention. A distinct spatial localization of the focal point of ecological devastation was recorded directly within the quarry zone (Dolyna tract), where NDVI values dropped critically (below 0.1–0.2) as a result of vegetation removal. An analysis of transition dynamics confirms that the highest level of degradation and spatial expansion of areas with exposed peat will occur in 2023–2024.

At the same time, the study revealed high ecological plasticity and strong regenerative potential of the deposit’s background ecosystem. It was established that the overall linear trend of NDVI values for the entire study period remains stable with a positive slope. As of 2025, the territorial expansion of peat extraction has ceased. Analysis of the Sankey diagram clearly visualizes macro-stabilization and an upward trend at the end of the period: significant areas of vegetation have massively shifted to higher NDVI classes (0.8–1.0).

It has been established that the integration of open Sentinel-2 multispectral optical data, the capabilities of the GEE platform, and methods for visualizing transition dynamics is an objective, reliable, and highly effective approach for environmental monitoring of active peatlands, enabling the optimization of strategies for sustainable natural resource use and wetland management.

Keywords: remote sensing, industrial peatlands, NDVI, Sentinel-2 multispectral data, Google Earth Engine (GEE), vegetation dynamics.

УДК 624.131:004.942

О. А. Овчаренко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1906-7021>

Кафедра мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

В. С. Фітаров*

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0478-3893>

Кафедра мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: fitarov24@gmail.com

Порівняльний аналіз універсальних програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання

Цитувати як:

Овчаренко, О. А., Фітаров, В. С. (2026). Порівняльний аналіз універсальних програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 197-212. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-15)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

У статті розглянуто питання вибору універсальних програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю врахування просторової роботи ґрунтового масиву, стабільності будівництва, контактної взаємодії, фільтраційних процесів і нелінійної поведінки ґрунтів. Метою роботи є порівняльний аналіз універсальних програмних комплексів для геотехнічного моделювання та визначення їх порівняльної придатності для типових задач геотехнічного проектування і задач підвищеної інженерної складності. Систематизовано основні групи програмного забезпечення: універсальні геотехнічні програмні комплекси, універсальні програмні комплекси чисельного моделювання загального призначення та вузькоспеціалізовані програми. Для детального порівняння обрано PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, ZSoil та Abaqus. Оцінювання виконано за п'ятьма критеріями: бібліотека моделей ґрунту, моделювання фундаментних систем, підтримка стабільності, автоматизація розрахунків і обробки результатів, стабільність розрахунку та контроль збіжності. Найвищий сумарний показник отримав PLAXIS 3D, який має найбільш збалансовані можливості для інженерного геотехнічного моделювання. Високу придатність також показав MIDAS GTS NX, особливо для фундаментних систем і стадійних задач. FLAC3D доцільний для задач із вираженою нелінійністю, великими деформаціями та геомеханічними особливостями. ZSoil забезпечує достатній інструментарій за умови контролю чисельної постановки. Abaqus є ефективним для нестандартних

контактних і дослідницьких задач, однак потребує більшої методичної підготовки. Отримані результати можуть бути використані при виборі програмного комплексу для моделювання основ, фундаментів і систем «грунт-конструкція».

Ключові слова: взаємодія «грунт-конструкція», моделі ґрунтів, палі, комбінований пальово-плитний фундамент, PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У сучасному геотехнічному проектуванні зростає потреба у розрахункових підходах, здатних враховувати неоднорідність ґрунтового масиву, нелінійну поведінку ґрунтів, контактну взаємодію, фільтраційні процеси, стадійність будівництва та просторову роботу системи «грунт-конструкція» [1]. Особливо актуальним це є для фундаментів мостових споруд, які працюють в умовах значних вертикальних, горизонтальних і моментних навантажень, а також підвищених вимог до обмеження осідань і нерівномірних деформацій [2].

Традиційні інженерні методи розрахунку, що базуються на спрощених розрахункових схемах, не завжди дозволяють достатньо повно врахувати зазначені чинники. Тому для аналізу плитних, пальових і комбінованих пальово-плитних фундаментів дедалі ширше застосовуються чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів і метод скінченних різниць [3, 4]. Коректне моделювання таких систем потребує не лише вибору відповідної розрахункової схеми, але й обґрунтованого вибору програмного забезпечення (ПЗ).

На практиці використовується значна кількість ПЗ, які відрізняються за своїм призначенням та придатністю до виконання різних типів задач. За відсутності єдиних критеріїв порівняння вибір ПЗ часто залежить від доступності програми, досвіду користувача або особливостей окремої задачі, що ускладнює об'єктивну оцінку його інженерної придатності.

У зв'язку з цим актуальним є порівняльний аналіз найбільш поширених програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання за єдиною системою критеріїв. Це дозволяє оцінити їх придатність для типових задач геотехнічного проектування і задач підвищеної інженерної складності.

Мета і завдання дослідження. Метою даної статті є виконання порівняльного аналізу універсальних програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання та формування практичних рекомендацій щодо їх застосування для типових задач геотехнічного

проектування і задач підвищеної інженерної складності. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- визначити критерії порівняння функціональних можливостей програмних комплексів;
- сформулювати перелік найбільш поширених програмних комплексів для геотехнічного аналізу;
- сформулювати перелік із п'яти універсальних програмних комплексів для подальшого порівняльного аналізу;
- виконати порівняння та аналіз обраних програмних комплексів за визначеними критеріями.

Матеріали та методи

У межах даної роботи програмні комплекси порівнюються за п'ятьма критеріями, що характеризують їх придатність до розв'язання задач геотехнічного проектування:

1) бібліотека моделей ґрунту та керованість їх параметризації. Оцінюються повнота набору моделей, можливість відтворення нелінійної деформованості, розвантаження і повторного навантаження, дренажної та недренажної поведінки, зв'язаних постановок з урахуванням порового тиску і фільтрації тощо;

2) можливості моделювання фундаментних систем. Порівняння виконується за придатністю до розрахунку плитних, паливних і комбінованих паливо-плитних фундаментів, а також за можливістю отримання проектно значущих результатів: осідань, нерівномірності деформацій, контактних тисків, реакцій і зусиль у палях та плиті тощо;

3) стадійність, тобто можливість відтворення будівельно-технологічної послідовності з перенесенням напружено-деформованого стану між етапами. Оцінюються активація та деактивація частин моделі, зміна навантажень і граничних умов, формування початкового напруженого стану та врахування часових ефектів;

4) автоматизація розрахункового моделювання та обробки результатів. Оцінюються програмне керування моделлю, запуск серій варіантних розрахунків, контроль перебігу обчислень і вилучення результатів у порівнюваному форматі;

5) стабільність чисельного розрахунку та контроль збіжності. Оцінюються керування розрахунковими кроками, критерії збіжності, діагностика причин незбіжності та здатність програмного комплексу виконувати нелінійні розрахунки в задачах із пластичністю ґрунтів, контактною взаємодією і наближенням до граничного стану.

Запропонована методика дозволяє зіставити програмні комплекси за критеріями, що безпосередньо впливають на інженерну придатність,

трудомісткість моделювання, відтворюваність розрахункового процесу та надійність результатів.

Для узагальнення результатів за всіма критеріями використано п'ятибальну шкалу оцінювання:

1) 5 балів – високий рівень придатності за відповідним критерієм, наявність необхідних інструментів і можливість отримання інженерно придатних результатів у типових та ускладнених геотехнічних задачах без суттєвих додаткових методичних процедур;

2) 4 бали – розвинені можливості з окремими обмеженнями або підвищеними вимогами до параметризації, калібрування, контролю збіжності чи чисельної стійкості;

3) 3 бали – достатня, але не повністю інтегрована придатність, що потребує значної участі користувача у формуванні, перевірці та інтерпретації моделі;

4) 2 бали – обмежена придатність, коли можливе лише часткове або спрощене виконання відповідного типу задач;

5) 1 бал – відсутність достатніх інструментів для коректного виконання розрахунків за відповідним критерієм.

Результати та обговорення

У практиці чисельного геотехнічного моделювання доцільно виділяти три групи програмних забезпечень: універсальні геотехнічні програмні комплекси, універсальні програмні комплекси чисельного моделювання загального призначення та вузькоспеціалізовані програми для окремих типів геотехнічних розрахунків.

До найбільш поширених універсальних геотехнічних програмних комплексів належать PLAXIS 2D та PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC та FLAC3D, ZSoil 2D та ZSoil 3D, Rocscience RS2 та RS3, GeoStudio, OPTUM G2 та OPTUM G3. Вони застосовуються для аналізу основ і фундаментів, котлованів (рис. 1), підпірних конструкцій, укосів, підземних споруд, фільтраційних процесів та інших задач взаємодії ґрунтового масиву з інженерними конструкціями [3, 5].

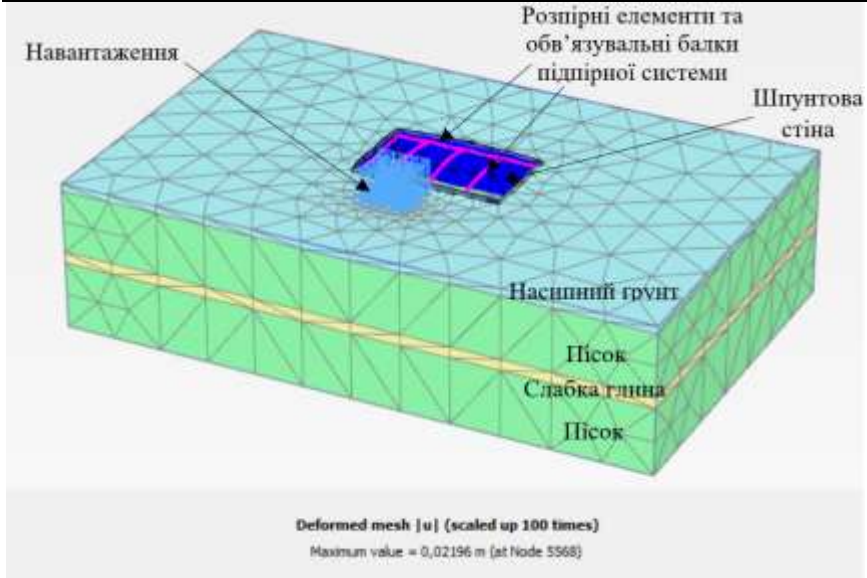


Рис. 1. Скінченно-елементна модель котловану в PLAXIS 3D

Універсальні програмні комплекси чисельного моделювання загального призначення, зокрема Abaqus, ANSYS Mechanical, DIANA FEA та COMSOL Multiphysics, не є суто геотехнічними, однак можуть застосовуватися для геотехнічних постановок за потреби моделювання складної контактної взаємодії, нелінійної поведінки матеріалів, динамічних впливів або зв'язаних фізичних процесів [6]. У вітчизняній проектній практиці також використовують LIRA-FEM (ЛІРА-САПР), SCAD Office та MOHOMAX-САПР, які мають окремі засоби врахування роботи ґрунтової основи. Зокрема, у LIRA-FEM передбачено систему «ГРУНТ». Такі комплекси розглядаються як суміжні інженерні інструменти, а не як повні аналоги універсальних геотехнічних програмних комплексів.

Вузькоспеціалізовані програми орієнтовані на окремі типи геотехнічних розрахунків: аналіз пальових фундаментів, оцінювання стійкості укосів, розрахунок фільтрації, осідань або виконання нормативно орієнтованих перевірок. Прикладами таких програм є LPILE, RSPile, програми GEO5, Slide2, Settle3 та інші [3]. Такі інструменти зручні для локальних інженерних перевірок і попередніх оцінок, однак не замінюють універсальні геотехнічні програмні комплекси, коли необхідно врахувати просторову роботу ґрунтового масиву, взаємний вплив елементів фундаментної системи та поетапність будівництва.

Для подальшого порівняльного аналізу обрано п'ять ПЗ: PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, ZSoil та Abaqus. PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D і ZSoil репрезентують універсальні геотехнічні ПЗ, тоді як Abaqus включено як універсальне ПЗ чисельного моделювання загального призначення, придатний для нестандартних геотехнічних постановок, зокрема задач зі складною контактною взаємодією або спеціалізованими матеріальними моделями. Вузькоспеціалізовані програми у подальшому порівнянні не розглядаються, оскільки метою є зіставлення саме універсальних інструментів для комплексного просторового моделювання системи «грунт-конструкція».

Порівняння ПЗ за першим критерієм виконано за складом, повнотою та інженерною придатністю бібліотек моделей ґрунту. Враховано орієнтовну кількість штатних моделей, наявність моделей нелінійної деформівності, малих деформацій, критичного стану, консолідації, повзучості, циклічної поведінки, розрідження та скельних масивів, а також можливість підключення користувацьких матеріальних моделей. Кількість моделей є орієнтовною, оскільки залежить від версії ПЗ, рівня ліцензії та способу підрахунку окремих модифікацій.

Найвищу оцінку за цим критерієм отримують PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX – 5 балів. PLAXIS 3D має спеціалізовану геотехнічну бібліотеку, що охоплює близько 14-16 моделей ґрунтів і скельних масивів. До характерних моделей належать Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Hardening Soil small, Modified Cam-Clay, Soft Soil Creep, Sekiguchi-Ohta, NGI-ADP, UBC3D-PLM, Hoek-Brown і Jointed Rock [7]. Це забезпечує покриття основних інженерних постановок, включно з нелінійною деформівністю, малими деформаціями, консолідацією, розрідженням і роботою скельних масивів. MIDAS GTS NX має понад 20 моделей і модифікацій, зокрема Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Hardening Soil small, Modified Cam-Clay, Soft Soil Creep, Sekiguchi-Ohta, Generalized SCLAY1S, Modified UBCSAND, PM4Sand, Hoek-Brown і Jointed Rock Mass [8]. Порівняно з PLAXIS 3D комплекс має ширший формальний перелік моделей, однак окремі моделі потребують уважної параметризації та перевірки відповідності конкретній геотехнічній постановці.

FLAC3D і ZSoil оцінено на 4 бали. FLAC3D має розвинену бібліотеку вбудованих і додаткових моделей та є сильним у задачах значної нелінійності, великих деформацій, динаміки, скельних масивів і слабких площин. Серед характерних моделей – Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Modified Cam-Clay, Plastic-Hardening, Soft-Soil, Finn, P2PSand, NorSand, Hoek-Brown, Ubiquitous-Joint та IMASS [9]. Нижча оцінка пояснюється тим, що для деформаційних задач фундаментів FLAC3D потребує більшої часті користувача у параметризації моделей та

інженерній інтерпретації результатів. ZSoil має компактнішу, але достатньо повну бібліотеку, що охоплює понад 10 моделей і модифікацій, зокрема Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Hardening Soil, Hardening Soil Small Strain, Modified Cam-Clay, Hoek-Brown, Multi-laminate та модель ущільнення для оцінювання розрідження [10]. Основні обмеження – менший обсяг бібліотеки порівняно з PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX та менш виражені можливості її розширення.

Abaqus оцінено на 3 бали. Його бібліотека є загальною бібліотекою матеріалів, тому окремі підрахунок геотехнічних моделей є умовним. Для геотехнічних постановок можуть застосовуватися Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Cam-Clay та Modified Cam-Clay, моделі повзучості та в'язкопластичності, контактні й когезійні моделі, а також користувацькі матеріальні моделі [11]. Основна перевага Abaqus полягає у гнучкості та можливості реалізації нестандартних матеріальних залежностей. Водночас відсутність повної штатної геотехнічної бібліотеки означає, що для відтворення спеціалізованих геотехнічних ефектів зазвичай потрібні додаткове налаштування, калібрування та верифікація.

У підсумку, за критерієм бібліотеки моделей ґрунту PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX є найбільш інженерно готовими спеціалізованими геотехнічними комплексами. FLAC3D має сильні позиції у задачах значної нелінійності, динаміки та скельних масивів, але потребує ретельнішої параметризації для фундаментних задач. ZSoil займає проміжну позицію, поєднуючи компактну бібліотеку з достатнім набором основних моделей. Abaqus поступається спеціалізованим геотехнічним комплексам за готовністю штатної бібліотеки, але залишається доцільним для нестандартних і дослідницьких постановок.

За другим критерієм оцінювалися можливості ПЗ щодо моделювання фундаментних систем: плитних, пальових і комбінованих пальово-плитних фундаментів. У таких задачах одночасно враховуються нелінійна робота ґрунту, взаємодія «ґрунт-конструкція», просторовий перерозподіл напружень і групова робота паль. Для практичного застосування важливими є коректне задання взаємодії між ґрунтом і конструктивними елементами, а також отримання проектно значущих результатів: осідань, реакцій і зусиль у палях, внутрішніх зусиль у плиті, розподілу навантаження між плитою й палями тощо.

Найвищу оцінку за другим критерієм отримують PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX – 5 балів. PLAXIS 3D забезпечує моделювання плитних, пальових і комбінованих пальово-плитних фундаментів у межах єдиної просторової постановки. Плита може задаватися плитними або об'ємними елементами, контакт із ґрунтом – інтерфейсними елементами, а палі – вбудованими балковими елементами [7]. Це дозволяє отримувати

осідання, контактні тиски, реакції та зусилля в палях, а також внутрішні зусилля в плиті без детального об'ємного моделювання кожної палі. Основне обмеження пов'язане з чутливістю результату до параметрів ґрунту, інтерфейсів і вбудованих пальових елементів.

MIDAS GTS NX також має високий рівень інженерної готовності для фундаментних задач. Комплекс підтримує просторове моделювання плит, пальових груп і комбінованих пальово-плитних систем, а спеціалізовані елементи палі та кінцевої ділянки палі дозволяють враховувати відносну роботу палі й ґрунту [8]. За складом проектних результатів MIDAS GTS NX є близьким до PLAXIS 3D, однак потребує уважного налаштування контактних параметрів і перевірки прийнятої схеми взаємодії палі з ґрунтом.

FLAC3D і ZSoil оцінено на 4 бали. FLAC3D дозволяє моделювати плити й палі через структурні елементи, а взаємодію палі з ґрунтом задавати через нормальні та дотичні зв'язки [9]. Його перевагою є придатність до задач зі значною нелінійністю, великими деформаціями та нетиповими шляхами навантаження. Водночас у фундаментних задачах він потребує ретельного калібрування параметрів взаємодії «палія-ґрунт» і «плита-ґрунт», а також додаткової обробки проектних результатів.

ZSoil забезпечує моделювання плитних, пальових і комбінованих постановок із використанням інтерфейсного елемента палі, що дозволяє враховувати тертьову взаємодію та відносні переміщення палі й ґрунту [10]. Для практичних фундаментних задач його можливості є достатніми, однак при великих пальових полях ефективність розрахунку більше залежить від чисельної стійкості та кількості інтерфейсних взаємодій.

Abaqus оцінено на 3 бали. Його перевагою є гнучке контактне моделювання, зокрема можливість описувати розділення, ковзання, когезійну взаємодію та нестандартні контактні умови [11]. Водночас для великих пальових і комбінованих пальово-плитних систем детальне тривимірне моделювання є ресурсомістким, а спрощені схеми потребують окремого методичного обґрунтування, калібрування та перевірки коректності перерозподілу навантаження між плитою й палями.

У підсумку, за критерієм моделювання фундаментних систем PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX є найбільш інженерно готовими для плитних, пальових і комбінованих пальово-плитних фундаментів. FLAC3D має переваги при значній нелінійності та великих деформаціях, але потребує більшого контролю параметрів взаємодії. ZSoil забезпечує коректну інтерфейсну реалізацію, проте є менш ефективним для великих пальових моделей. Abaqus має найширші можливості контактного моделювання, але поступається спеціалізованим геотехнічним ПЗ за готовністю до типового інженерного застосування в задачах фундаментів.

За третім критерієм оцінювалися можливості ПЗ щодо задання стадійності розрахунку. У геотехнічному моделюванні стадійність передбачає відтворення будівельно-технологічної послідовності зі зміною активності ґрунту, конструктивних елементів, навантажень, граничних і гідрогеологічних умов. Для фундаментних задач це є принциповим, оскільки осідання, контактні тиски, реакції в палях і розвиток пластичних зон залежать не лише від кінцевої конфігурації системи, а й від шляху навантаження.

Найвищу оцінку за третім критерієм отримують PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX – 5 балів. У PLAXIS 3D стадійність реалізована через систему розрахункових фаз, що дозволяє керувати активацією та деактивацією ґрунту, конструкцій, навантажень і водних умов із послідовним перенесенням напружено-деформованого стану між етапами [7]. У MIDAS GTS NX аналіз стадій будівництва дає змогу формувати послідовність додавання або вилучення елементів, навантажень і граничних умов у межах просторової моделі [8]. Обидва комплекси мають високий рівень інженерної готовності для стадійних геотехнічних задач, однак MIDAS GTS NX потребує уважнішої організації стадій і контролю контактних умов на кожному етапі.

FLAC3D і ZSoil оцінено на 4 бали. У FLAC3D стадійність задається шляхом послідовного змінювання моделі з доведенням її до нового стану рівноваги після кожної зміни. Такий підхід є гнучким для моделювання виїмок, монтажу конструкцій, поетапного навантаження та розвитку нелінійних процесів, але потребує самостійного контролю рівноваги, неврівноважених сил і зв'язку етапів із фізичним часом [9]. У ZSoil етапність пов'язана з покроковим оновленням розрахункової схеми, активності елементів і жорсткості системи. Перевагою є можливість поєднання будівельних стадій із консолідацією, фільтрацією та іншими часовими ефектами [10]. Водночас для складних просторових постановок потрібний уважний контроль переходів між етапами та чисельної стійкості.

Abaqus оцінено на 3 бали. Він має універсальні засоби розрахункових кроків, геостатичну процедуру та механізми зміни складу моделі, що дозволяє імітувати поетапну виїмку ґрунту, активацію конструкцій і зміну контактних умов [11]. Проте ці інструменти не утворюють спеціалізованого геотехнічного робочого процесу, тому стадійні геотехнічні постановки в Abaqus потребують більшої методичної підготовки, перевірки початкового напруженого стану, контактів і переходів між кроками.

У підсумку за критерієм стадійності PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX є найбільш інженерно готовими для відтворення будівельної послідовності.

FLAC3D забезпечує високу гнучкість поетапного змінювання моделі, ZSoil краще поєднує стадійність із часовими процесами, а Abaqus має широкі загальні можливості, але поступається спеціалізованим геотехнічним комплексам за зручністю стадійного моделювання.

За четвертим критерієм оцінювалися засоби автоматизації розрахункового моделювання та обробки результатів. Враховано можливість програмного керування моделлю, зміни параметрів, запуску серій варіантних розрахунків, контролю перебігу обчислень і вилучення результатів у порівнюваному форматі. Цей критерій є важливим для параметричних досліджень, перевірки декількох розрахункових сценаріїв і зменшення ризику помилок при повторенні однотипних операцій.

Найвищу оцінку за четвертим критерієм отримують PLAXIS 3D, FLAC3D і Abaqus – 5 балів. У PLAXIS 3D програмне керування через Python та REST API дозволяє автоматизувати зміну параметрів, формування фаз розрахунку, запуск задач і вилучення результатів, що є зручним для параметричних розрахунків і стандартизованої постобробки [7]. FLAC3D поєднує FISH і Python, завдяки чому користувач може керувати моделлю, перебігом розрахунку, контрольними величинами та обробкою результатів, що особливо корисно для нестандартних алгоритмічних процедур [9]. Abaqus має розвинений Python Scripting Interface, який охоплює побудову моделі, зміну параметрів, запуск задач і доступ до бази результатів, однак геотехнічна логіка автоматизації, зокрема початковий стан, контактні умови та критерії вилучення результатів, формалізується користувачем [11].

MIDAS GTS NX оцінено на 4 бали. Комплекс підтримує пакетне виконання розрахунків і параметричний аналіз, що дозволяє організувати серії варіантних задач, контролювати перебіг розрахунку та порівнювати результати [8]. Водночас його можливості сценарного керування моделлю та автоматизованого вилучення результатів є менш гнучкими, ніж у комплексах із розвиненим програмним інтерфейсом.

ZSoil оцінено на 3 бали, оскільки він підтримує пакетне виконання підготовлених задач, роботу зі списками розрахунків і файловою організацією результатів [10]. Цього достатньо для повторюваних інженерних серій, однак можливості сценарної зміни моделі та автоматизованої постобробки є обмеженішими порівняно з PLAXIS 3D, FLAC3D, Abaqus і MIDAS GTS NX.

У підсумку за критерієм автоматизації PLAXIS 3D, FLAC3D і Abaqus мають найширші можливості програмного керування розрахунковим процесом. MIDAS GTS NX займає проміжну позицію завдяки пакетному та параметричному аналізу, а ZSoil є придатним переважно для серій попередньо підготовлених розрахунків.

За п'ятим критерієм оцінювалася стабільність чисельного розрахунку, тобто здатність ПЗ надійно виконувати нелінійні розрахунки у задачах із пластичністю ґрунтів, контактною взаємодією, різкою зміною жорсткості, розвантаженням, поетапністю та наближенням до граничного стану. Для практичного застосування важливими є керування розрахунковими кроками, критерії збіжності, діагностика причин незбіжності та можливість відрізнити фізичне руйнування від чисельної нестійкості.

Окремо враховано обчислювальну ефективність великих просторових моделей, зокрема підтримку багатоядерних процесорів, паралельних обчислень і GPU-прискорення для окремих розв'язувачів, оскільки ці чинники впливають на практичну можливість виконання ресурсомістких 3D-розрахунків.

Найвищу оцінку за п'ятим критерієм отримують PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX і ZSoil – 5 балів. У PLAXIS 3D передбачено геотехнічно орієнтоване керування фазами, розрахунковими кроками та критеріями збіжності, що забезпечує стабільне виконання більшості фундаментних і стадійних задач. Для великих моделей перевагою є підтримка багатоядерних і паралельних розрахунків, ефективність яких залежить від типу аналізу, структури фаз і розміру сітки [7]. MIDAS GTS NX має засоби керування нелінійним розрахунком, критеріями збіжності та приростом навантаження. Додатковою перевагою є метод дуги навантаження, який підвищує надійність проходження нестійких ділянок рівноважної траєкторії при наближенні до граничного стану [8]. З погляду обчислювальних ресурсів MIDAS GTS NX дозволяє задавати кількість процесорів для аналізу, а для окремих розв'язувачів можливе використання GPU-прискорення. ZSoil вирізняється наявністю декількох нелінійних розв'язувачів, формалізованих критеріїв збіжності та засобів покращення ітераційного процесу. Його сильна сторона полягає у діагностичній прозорості розрахунку за нормами невірноваженості та енергетичними показниками [10]. Підтримка паралельних обчислень за моделлю спільної пам'яті підвищує його придатність для ресурсомістких нелінійних задач.

FLAC3D і Abaqus оцінено на 4 бали. FLAC3D принципово відрізняється від неявних скінченно-елементних комплексів, оскільки досягнення квазістатичної рівноваги базується на явному алгоритмі з демпфуванням. Це є ефективним для задач розвитку руйнування, великих деформацій і значної нелінійності, однак потребує уважного вибору демпфування, критеріїв зупинки та контролю невірноважених сил [9]. Багатопотокова реалізація FLAC3D може бути перевагою для великих 3D-моделей, хоча приріст швидкодії залежить від типу задачі та використаних

процедур. Abaqus має розвинені засоби нелінійного аналізу, керування контактом, автоматичного вибору кроку та стабілізації, а також підтримує паралельне виконання і GPU-прискорення для окремих розв'язувачів [11]. Проте в геотехнічних задачах результат значною мірою залежить від прийнятої методики, параметрів контакту, початкового стану, дискретизації та контролю впливу штучного демпфування.

У підсумку за критерієм стабільності розрахунків PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX і ZSoil мають найкраще поєднання стійкості нелінійного розрахунку та діагностичної прозорості. FLAC3D є сильним у задачах розвитку руйнування і значної нелінійності, але потребує більшого контролю параметрів демпфування. Abaqus має потужні загальні засоби стабілізації та ефективного виконання ресурсомістких розрахунків, однак для геотехнічних постановок вимагає ретельнішого методичного налаштування. Для великих просторових моделей вибір ПЗ має враховувати не лише стійкість і збіжність, а й швидкодію, що залежить від типу розв'язувача, паралельного виконання, розміру сітки, кількості контактів, стадій та апаратних ресурсів.

Для узагальнення результатів виконано підсумкове оцінювання програмних комплексів за п'ятьма розглянутими критеріями, що наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Підсумкова оцінка ПЗ за критеріями порівняння

Критерій порівняння	PLAXIS 3D	MIDAS GTS NX	FLAC3D	ZSoil	Abaqus
1- бібліотека моделей ґрунту	5	5	4	4	3
2 - моделювання фундаментів	5	5	4	4	3
3 - стадійність	5	5	4	4	3
4 - автоматизація	5	4	5	3	5
5 - стабільність розрахунків	5	5	4	5	4
Сумарна оцінка	25	24	21	20	18

За сумарною оцінкою найвищий результат отримав PLAXIS 3D – 25 балів, що свідчить про найбільш збалансовану придатність комплексу для геотехнічного чисельного моделювання. MIDAS GTS NX отримав 24 бали

і є близьким до PLAXIS 3D за інженерною готовністю, однак поступається за рівнем сценарної автоматизації. FLAC3D отримав 21 бал завдяки сильним можливостям автоматизації та моделювання значної нелінійності, але потребує більшого контролю параметризації в типових фундаментних задачах. ZSoil отримав 20 балів, вирізняючись стабільністю розрахунків і діагностикою збіжності, проте має скромніші засоби автоматизації. Abaqus отримав 18 балів: він є сильним інструментом для автоматизації та контактної моделювання, але поступається спеціалізованим геотехнічним комплексам за готовністю до типових інженерних постановок.

Висновки

У статті систематизовано програмні комплекси для геотехнічного чисельного моделювання, визначено п'ять критеріїв їх порівняння та виконано оцінювання PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, ZSoil і Abaqus з позицій інженерної придатності.

Для більшості проектних задач основ і фундаментів із урахуванням стадійності будівництва, найбільш доцільним є застосування PLAXIS 3D або MIDAS GTS NX. Ці комплекси забезпечують збалансоване поєднання моделей ґрунту, інструментів для фундаментних систем, контактної взаємодії, стадійності та отримання проектно значущих результатів.

Для задач із вираженою нелінійністю, великими деформаціями, розвитком зон руйнування, скельними масивами або складними шляхами навантаження доцільним є FLAC3D. Для задач, де визначальними є контроль збіжності, консолідація, фільтрація та часові ефекти, доцільно розглядати ZSoil. Abaqus є ефективним для нестандартних контактних, дослідницьких і спеціалізованих постановок, зокрема за потреби реалізації користувацьких матеріальних моделей або детального моделювання взаємодії конструктивних елементів.

Отримані результати можуть бути використані як практично орієнтована основа для вибору програмного комплексу залежно від типу геотехнічної задачі та необхідного рівня деталізації розрахункової моделі. Наведене оцінювання відображає порівняльну придатність програмних комплексів у межах визначених критеріїв і не є абсолютним ранжуванням для всіх можливих інженерних задач.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., & Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1120351. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1120351>
2. Firoozi, A. A., Naji, M., & Firoozi, A. A. (2023). Effects of soil-structure interaction on performance of bridges during earthquakes. Case study: Integral abutment bridge in Pennsylvania, USA. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47, 3487-3505. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01122-w>
3. Chimdesa, F. F., Chimdesa, F. F., Jilo, N. Z., Hulagabali, A., Babalola, O. E., Tiyasha, T., Ramaswamy, K., Kumar, A., & Bhagat, S. K. (2023). Numerical analysis of pile group, piled raft, and footing using finite element software PLAXIS 2D and GEO5. *Scientific Reports*, 13, 15875. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42783-x>
4. Chanda, D., Saha, R., Haldar, S., & Choudhury, D. (2023). State-of-the-art review on responses of combined piled raft foundation subjected to seismic loads using static and dynamic approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 169, 107869. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107869>
5. Wang, Z., Cai, J., Wei, P., Yang, X., & Xu, Y. (2025). Optimization of pile reinforcement in soft soils: A numerical analysis. *Applied Sciences*, 15(23), 12443. <https://doi.org/10.3390/app152312443>
6. Deb, P., & Pal, S. K. (2019). Numerical analysis of piled raft foundation under combined vertical and lateral loading. *Ocean Engineering*, 190, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106431>
7. Bentley Systems. (2025). *PLAXIS 3D 2025.1 manuals*. Retrieved May 9, 2026, from https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0107989
8. MIDAS IT. (2019). *GTS NX on-line manual*. Retrieved May 9, 2026, from https://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/310/GTS_NX/Welcome_to_GT_S_NX/Intro.htm
9. Itasca Consulting Group. (2025). *FLAC (FLAC2D/FLAC3D): Itasca software 9.0 documentation*. Retrieved May 9, 2026, from <https://docs.itascacg.com/itasca900/flac3d/docproject/source/flac3dhome.html>
10. GeoDev. (2026). *ZSoil 2026 theoretical manual*. Retrieved May 9, 2026, from https://www.zsoil.com/zsoil_manual/TM-Man.pdf
11. Dassault Systèmes. (2024). *Abaqus 2024 documentation*. Retrieved May 9, 2026, from <https://docs.software.vt.edu/abaqusv2024/English/>

Література

1. Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., & Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1120351. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1120351>
2. Firoozi, A. A., Naji, M., & Firoozi, A. A. (2023). Effects of soil-structure interaction on performance of bridges during earthquakes. Case study: Integral abutment bridge in Pennsylvania, USA. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47, 3487-3505. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01122-w>
3. Chimdesa, F. F., Chimdesa, F. F., Jilo, N. Z., Hulagabali, A., Babalola, O. E., Tiyasha, T., Ramaswamy, K., Kumar, A., & Bhagat, S. K. (2023). Numerical analysis of pile group, piled raft, and footing using finite element software PLAXIS 2D and GEO5. *Scientific Reports*, 13, 15875. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42783-x>
4. Chanda, D., Saha, R., Haldar, S., & Choudhury, D. (2023). State-of-the-art review on responses of combined piled raft foundation subjected to seismic loads using static and dynamic approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 169, 107869. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107869>
5. Wang, Z., Cai, J., Wei, P., Yang, X., & Xu, Y. (2025). Optimization of pile reinforcement in soft soils: A numerical analysis. *Applied Sciences*, 15(23), 12443. <https://doi.org/10.3390/app152312443>
6. Deb, P., & Pal, S. K. (2019). Numerical analysis of piled raft foundation under combined vertical and lateral loading. *Ocean Engineering*, 190, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106431>
7. Bentley Systems. (2025). *PLAXIS 3D 2025.1 manuals*. Дата звернення: 09.05.2026. https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0107989
8. MIDAS IT. (2019). *GTS NX on-line manual*. Дата звернення: 09.05.2026. https://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/310/GTS_NX/Welcome_to_GTS_NX/Intro.htm
9. Itasca Consulting Group. (2025). *FLAC (FLAC2D/FLAC3D): Itasca software 9.0 documentation*. Дата звернення: 09.05.2026. <https://docs.itascacg.com/itasca900/flac3d/docproject/source/flac3dhome.html>
10. GeoDev. (2026). *ZSoil 2026 theoretical manual*. Дата звернення: 09.05.2026. https://www.zsoil.com/zsoil_manual/TM-Man.pdf
11. Dassault Systèmes. (2024). *Abaqus 2024 documentation*. Дата звернення: 09.05.2026. <https://docs.software.vt.edu/abaqusv2024/English/>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 13.05.2026	Received 13.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 17.05.2026	Received in revised form 17.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. A. Ovcharenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1906-7021>
Department of bridges, structures and construction mechanics named after V.O. Rosiiskiy

V. S. Fitarov*

PhD student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0478-3893>

Department of bridges, structures and construction mechanics named after V.O. Rosiiskyi

Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudryho St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail: fitarov24@gmail.com

Comparative analysis of comprehensive software packages for geotechnical numerical modelling

How to Cite:

Ovcharenko, O. A., & Fitarov, V. S. (2026). Comparative analysis of comprehensive software packages for geotechnical numerical modelling. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 197-212. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-15)

The article considers the issue of selecting universal software packages for geotechnical numerical modelling of the soil-structure interaction system. The relevance of the study is determined by the need to account for the spatial behaviour of the soil mass, construction staging, contact interaction, seepage processes, and nonlinear soil behaviour. The aim of the study is to perform a comparative analysis of universal software packages for geotechnical modelling and to determine their comparative suitability for typical geotechnical design tasks and tasks of increased engineering complexity. The main groups of software are systematized: universal geotechnical software packages, general-purpose numerical modelling software packages, and specialized programs for specific geotechnical calculations. PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, ZSoil, and Abaqus were selected for detailed comparison. The assessment was performed according to five criteria: soil model libraries, modelling of foundation systems, support for staged construction, automation of calculations and result processing, calculation stability and convergence control. PLAXIS 3D achieved the highest total score, demonstrating the most balanced capabilities for engineering geotechnical modelling. MIDAS GTS NX also showed high suitability, particularly for foundation systems and staged construction tasks. FLAC3D is appropriate for problems involving pronounced nonlinearity, large deformations, and geomechanical features. ZSoil provides sufficient functionality, provided that the numerical formulation is properly controlled. Abaqus is effective for nonstandard contact and research-oriented tasks. However, it requires more extensive methodological preparation. The obtained results can be used when selecting a software package for modelling foundation soils, foundations, and soil-structure interaction systems.

Keywords: soil-structure interaction, constitutive soil models, piles, combined piled-raft foundation, geotechnical numerical modelling, PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX.

УДК 656.11:656.054

В. О. Процюк*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2644-9490>

Кафедра будівництва та інфраструктурної інженерії
Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

І. М. Ясюк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2087-594X>

Кафедра будівництва та інфраструктурної інженерії
Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. П. Шимчук

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0564-2673>

Кафедра будівництва та інфраструктурної інженерії
Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

М. В. Бодак

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>

Кафедра автомобільного транспорту
Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: v.protsiuk@lutsk-ntu.com.ua

Обґрунтування параметрів світлофорного регулювання, як інженерного облаштування вулиць і доріг для організації дорожнього руху на міській вулиці

Цитувати як:

Процюк, В. О., Ясюк, І. М., Шимчук, О. П., Бодак, М. В. (2026). Обґрунтування параметрів світлофорного регулювання, як інженерного облаштування вулиць і доріг для організації дорожнього руху на міській вулиці. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 213-225. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-16)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розглянуто питання обґрунтування параметрів світлофорного регулювання та удосконалення організації дорожнього руху на міській магістралі з інтенсивним транспортним і пішохідним рухом. Особливу увагу приділено підвищенню ефективності функціонування регульованого перехрестя в умовах значної інтенсивності транспортних потоків і високої концентрації пішохідного руху, що є характерним для сучасної міської вулично-дорожньої мережі, особливо для спальних районів.

Проведено комплексний аналіз планувальних характеристик досліджуваної ділянки, геометричних параметрів проїзної частини, умов руху транспортних засобів і пішоходів, а також особливостей організації руху в межах перехрестя.

У процесі наукового дослідження виконано оцінку інтенсивності транспортних потоків і пішохідного руху за напрямками, визначено потоки насичення для окремих смуг та обчислено фазові коефіцієнти, що дало змогу встановити раціональні параметри роботи світлофорного об'єкта. На основі

отриманих результатів здійснено розрахунок оптимальної тривалості циклу світлофорного регулювання, а також визначено часові параметри окремих фаз і проміжних тактів з урахуванням вимог безпеки дорожнього руху, пропускної здатності перехрестя та необхідності забезпечення безпечного переходу проїзної частини пішоходами.

Під час розроблення заходів з удосконалення організації дорожнього руху враховано потреби маломобільних груп населення, зокрема вимоги щодо доступності пішохідної інфраструктури та достатньої тривалості пішохідних інтервалів. Запропоновані інженерно-організаційні рішення, що спрямовані на зменшення транспортних затримок, підвищення рівня безпеки усіх учасників дорожнього руху, а також здійснено оптимізацію режимів роботи світлофорного регулювання та створення більш комфортних і безпечних умов пересування для всіх категорій користувачів вулично-дорожньої мережі.

Ключові слова: світлофорне регулювання, організація дорожнього руху, фазовий коефіцієнт, потік насичення, цикл регулювання, безпека дорожнього руху.

Вступ

Зростання інтенсивності транспортних і пішохідних потоків у містах зумовлює необхідність удосконалення методів організації дорожнього руху. Одним із ефективних та недорогих засобів підвищення безпеки на перехрестях і пішохідних переходах є впровадження світлофорного регулювання.

Невідповідність параметрів роботи світлофорних об'єктів фактичній інтенсивності руху призводить до утворення заторів, збільшення транспортних затримок та підвищення аварійності. Тому актуальним є наукове обґрунтування тривалості циклу регулювання та його фаз із урахуванням транспортних характеристик конкретної ділянки міської вулично-дорожньої мережі.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Питання щодо організації дорожнього руху закріплене міжнародними принципами сигналів і кольорів, знаків і розмітки, що було задеклароване на Віденській конвенції про дорожні знаки і сигнали у 1968 році [1].

Питання організації дорожнього руху та світлофорного регулювання висвітлені у працях вітчизняних (М.Ф. Дмитриченко, 2005 [2], В.П. Поліщук, 2014, [3], О.М. Лобашов, С. Куш, 2017 [4], В. Доля, 2005 [2], Є. В. Гаврилов, 2005 [2], О. Капський) і зарубіжних (F. V. Webster, 1958 [5], D. I. Robertson, M. Papageorgiou, 2021 [6], Pravin Varaiya, 2016 [7], Umit Ozguner, 2004 [8], Baher Abdulhai, 2023 [9], HuaWei, Scott Sanner, Mirchandani Pitu, 1990 [10], Carlos F. Daganzo, 2003 [11], 2019 [12]) дослідників, а також у чинних нормативних документах України (ДБН

В.2.3-5:2018 «Вулиці та дороги населених пунктів» [13], ДСТУ 4092:2024 «Світлофори дорожні. Загальні технічні умови» [14]).

М. Papageorgiou, Pravin Varaiya, Scott Sanner, Mirchandani Pitu досліджували питання, що стосуються адаптивного управління транспортними потоками та світлофорного регулювання. Тоді, як F. V. Webster, D. I. Robertson, Carlos F. Daganzo займалися оптимізацією циклів світлофорного регулювання. Baher Abdulhai запроваджує застосування штучного інтелекту та машинного навчання для адаптивного світлофорного регулювання.

Вітчизняні науковці займаються моделюванням транспортних потоків на перехрестях та присвячують свої праці розвитку інтелектуальних транспортних систем.

В науковій праці [15] було розглянуте питання щодо удосконалення світлофорного регулювання на прикладі перехрестя вулиць в місті Луцьку.

Методика розрахунку тривалості циклу базується на визначенні потоків насичення та фазових коефіцієнтів, що дозволяє встановити пропорційність між інтенсивністю руху та тривалістю дозволяючих сигналів.

Щодо зарубіжних методик, які дозволяють розрахувати тривалість мінімальних зелених фаз, координації коридорів, велосипедних фаз, пішохідних переходів, застосовують NCHRP Report 812 / Signal Timing Manual (FHWA), а для вибору світлофорного обладнання користуються EN 12368:2024 / BS EN 12368.

Разом із тим, на практиці часто застосовуються типові або застарілі схеми регулювання без урахування реальних транспортних навантажень, добових коливань інтенсивності руху та потреб маломобільних груп населення. Це зумовлює необхідність комплексного підходу до обґрунтування параметрів світлофорного регулювання на конкретних міських ділянках.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження – обґрунтування параметрів світлофорного регулювання та вдосконалення організації дорожнього руху на міській вулиці на основі аналізу транспортних характеристик.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- проаналізувати планувальні характеристики ділянки вулично-дорожньої мережі;
- визначити інтенсивність транспортних і пішохідних потоків на магістральних і житлових вулицях;
- розрахувати потоки насичення та фазові коефіцієнти;

- встановити оптимальну тривалість циклу світлофорного регулювання;

- перевірити відповідність параметрів вимогам безпеки та доступності об'єкта для пішоходів;

- оцінити ефективність запропонованих рішень.

Вирішення поставлених завдань дослідження дозволить оптимізувати режими роботи світлофорних об'єктів. Це в свою чергу забезпечить пропускну здатність даного вузла вулиці.

Матеріали та методи

У процесі дослідження параметрів світлофорного регулювання та вдосконалення організації дорожнього руху були використані матеріали топографо-геодезичної зйомки масштабу 1:500 для розроблення схеми організації дорожнього руху.

Схеми організації дорожнього руху були розроблені відповідно до наступних нормативних документів з організації дорожнього руху ДСТУ 8752:2017, ДСТУ 2587:2021, ДСТУ 4100:2021 та ДСТУ 4092:2024.

Під час натурних наукових досліджень визначали інтенсивність транспортного руху та пішоходів. Отримані матеріали використовувались для формування картограми інтенсивності транспортних і пішохідних потоків.

Застосовували методику визначення потоків насичення та фазових коефіцієнтів для розрахунку циклічності роботи світлофорів.

Потоки насичення визначалися з урахуванням ширини проїжджої частини, поздовжніх ухилів та структури транспортного потоку. Фазові коефіцієнти розраховувалися як відношення інтенсивності руху до потоку насичення для кожного напрямку руху.

Тривалість циклу світлофорного регулювання визначалася з урахуванням втрат часу на проміжні такти та забезпечення безпечного пропуску пішоходів. Додатково враховано вимоги доступності для маломобільних груп населення.

Результати та обговорення

Для дослідження оптимізації безпеки та організації дорожнього руху з метою обґрунтування параметрів світлофорного регулювання нами було обрано одну з найбільш завантажених магістральних вулиць міста Луцька – проспект Соборності.

Під час дослідження було запропоновано використати перехрестя проспекту Соборності з вулицею Воїнів-Афганців.

В подальших дослідженнях було визначено інтенсивність транспортного потоку та пішохідного руху

Провівши аналіз картограми інтенсивності руху перехрестя (рис. 1) виникає необхідність безконфліктного пропуску транспортного потоку 1, 4 і 6. Правоповоротні і лівоповоротні потоки 2, 3, 5, 7, 8, 9 і 10 з урахуванням картограми інтенсивності руху перехрестя, а також звертаючи увагу на інтенсивність транспортного 1, 4, 6 і пішохідного 11, 12, 13 потоків, вказаний лівий поворот 2, 3, 5 може бути організований методом «просочування» (у відповідності з принципами пофазного роз'їзду конфліктні точки вважаються допустимими).

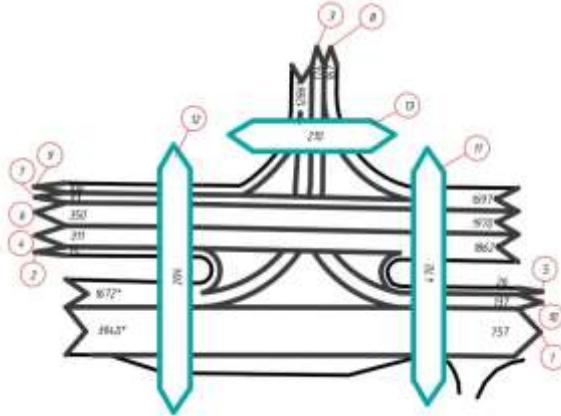


Рис. 1 Картограми інтенсивності руху

Отже, організація руху на перехресті може здійснюватися у двофазному режимі з введенням проміжного такту, призначеного для пропуску лівоповоротного транспортного потоку з проспекту Соборності, із забезпеченням пропуску:

в 1-ій фазі – рух по пр. Соборності транспортних потоків прямого напрямку (транспортні потоки 1, 4, 6, 7) з нерегульованим поворотом ліворуч на вул. Воїнів-Афганців (3) і лівоповоротного потоку на розворот по пр. Соборності (2, 5), правого повороту з пр. Соборності на вул. Воїнів-Афганців (8) і пішоходів через вул. Воїнів-Афганців (13) (рис. 2а);

в 1*-ій фазі – рух по пр. Соборності в сторону вулиці В'ячеслава Чорновола зупиняється, що дозволяє безперешкодно провести рух транспортних потоків 2 і 3, потік 1 продовжує рух в даній фазі; пішоходам дозволено рух через вул. Воїнів-Афганців (13), а також через пр. Соборності (11, 12) до острівця безпеки зі сторони вул. Воїнів-Афганців (рис. 2б);

в 2-ій фазі – рух дозволений для транспортних потоків з вул. Воїнів-

Афганців (9, 10) і пішохідних потоків через пр. Соборності (11, 12) з обох боків перехрестя (рис. 2в).

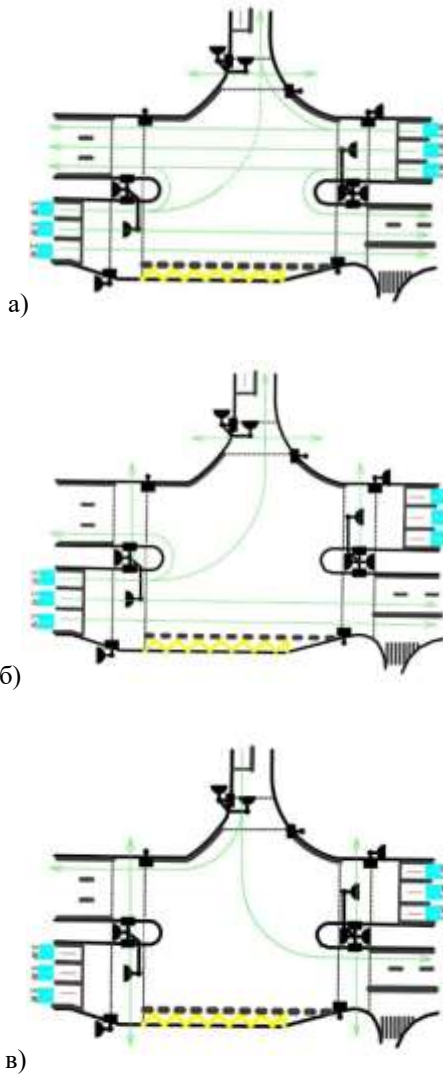


Рис. 2 Схема пофазного роз'їзду 1-а фаза (а), 1*-а фаза (б), 2-а фаза (в)

Таким чином:

Для руху по пр. Соборності в сторону ТЦ «Гостинець» з двох смуг:

$$M_{n1(1)} \text{ прямо} = 2 \times 1970 = 3940 \text{ од/год.}$$

Для повороту з пр. Соборності наліво (на вул. Воїнів-Афганців і на розворот) – $R = 20$ м:

$$M_{n1(2-3)} \text{ ліворуч} = 1800 / (1 + 1,525/20) = 1672 \text{ од/год.}$$

Для руху по пр. Соборності в сторону вул. В'ячеслава Чорновола прямо і наліво на розворот:

$$M_{n1(4-5)} \text{ прямо і ліворуч} = 1970 \times 100 / (92,28 + 1,75 \times 7,72) = 1862 \text{ од/год.}$$

Для руху по пр. Соборності в сторону вул. В'ячеслава Чорновола прямо:

$$M_{n1(6)} \text{ прямо} = 1970 \text{ од/год.}$$

Для руху по пр. Соборності в сторону вул. В'ячеслава Чорновола прямо і направо на вул. Воїнів-Афганців:

$$M_{n1(7-8)} \text{ прямо і направо} = 1970 \times 100 / (35,77 + 1,25 \times 64,23) = 1697 \text{ од/год.}$$

В 2-ій фазі для руху по вул. Воїнів-Афганців наліво і направо:

$$M_{n2(9-10)} \text{ наліво і направо} = 1970 \times 100 / (1,75 \times 56,38 + 1,25 \times 43,62) = 1286 \text{ од/год.}$$

У розрахунках потоки насичення, тривалість циклів і тактів регулювання заокруглено до цілих значень, фазові коефіцієнти і міри насичення напрямів – до другого знаку після коми.

Таким чином:

$$M_{n1(1)} = 3940 \text{ од/год.}$$

$$У1(1) = 757/3940 = 0,19$$

$$M_{n1(2-3)} = 1672 \text{ од/год.}$$

$$У1(2-3) = 189/1672 = 0,11$$

$$M_{n1(4-5)} = 1862 \text{ од/год.}$$

$$У1(4-5) = 337/1862 = 0,18$$

$$M_{n1(6)} = 1970 \text{ од/год.}$$

$$У1(6) = 350/1970 = 0,18$$

$$M_{n1(7-8)} = 1697 \text{ од/год.}$$

$$У1(7-8) = 260/1697 = 0,15$$

$$M_{n2(9-10)} = 1286 \text{ од/год.}$$

$$У2(9-10) = 243/1286 = 0,19$$

В якості розрахункових для кожної фази вибрані найбільші фазові коефіцієнти, тобто $У1 = 0,19$; $У2 = 0,19$. Їх сума $У = 0,19 + 0,19 = 0,38$.

Таким чином, тривалість циклу і основних тактів регулювання становлять:

$$Т_{ц} = (1,5 \times 8 + 5) / (1 - 0,38) = 28 \text{ с}$$

Структура циклу регулювання : $28 = 10 + 4 + 10 + 4$.

$$Т_{о1} = ((28 - 8) \times 0,19) / 0,38 = 10 \text{ с;}$$

$$T_{o2} = ((28-8) \times 0,19) / 0,38 = 10 \text{ с.}$$

В 1-ій фазі пішоходи переходять проїжджу частину вул. Воїнів-Афганців – 10 м. В 2-ій фазі пішоходи переходять проїжджу частину пр. Соборності шириною 22 м. Проміжок часу, необхідний для перетинання пішоходами проїзної частини (t_{niu}):

$$T_{niu11} = 5 + 22/1,3 = 21,9 \text{ с.}$$

$$T_{niu12} = 5 + 22/1,3 = 21,9 \text{ с.}$$

$$T_{niu13} = 5 + 10/1,3 = 12,7 \text{ с.}$$

В 1-й та 2-ій фазі пішоходи не встигають закінчити перехід проїжджої частини, оскільки $T_{niu13} > T_{o1}$, $T_{niu11} > T_{o2}$, $T_{niu12} > T_{o2}$. Тому необхідно скоригувати цикл, прийнявши $T_{o1} = T_{niu13} = 13 \text{ с.}$, $T_{o2} = T_{niu12} = 22 \text{ с.}$ Після коригування структура циклу: $65 = 13 + 22 + 8 + 22$.

Прийняту схему пофазного роз'їзду та скореговану структуру циклу покладено в основу організації розміщення технічних засобів на перехресті, а також формування графіку режиму функціонування світлофорної сигналізації зображено на рисунку 3.

Згідно із загальноприйнятими умовними позначеннями, на плані перехрестя транспортні світлофори типу 1 зображені у вигляді півкуль, додаткові секції обладнані стрілками, що вказують напрямок їх дії, а пішохідні світлофори показані у формі прямокутників. Кожному світлофору присвоєно відповідний номер, який відображений у графіку режиму світлофорної сигналізації. У центральній частині графіка наведено послідовність зміни сигналів світлофорів, позначених ліворуч, тоді як у нижній частині подано тривалість дії відповідних сигналів.

Координація роботи світлофорного об'єкта з іншими світлофорними об'єктами по проспекту Соборності і приведення їх у відповідність до режиму «зелена хвиля» розробляється в комплексі з усіма світлофорами по проспекті Соборності і додається в загальному проекті.

У результаті розрахунків визначено раціональну двофазну схему організації руху. Отримано оптимальну структуру циклу світлофорного регулювання з урахуванням транспортної інтенсивності пікового періоду. Це дасть можливість оптимізувати рух пішоходів через проспект Соборності та рух транспорту, що виїжджають з прилеглої вулиці.

Встановлено, що збільшення тривалості дозволяючого сигналу для основного транспортного напрямку дозволяє зменшити затримки та підвищити пропускну спроможність. Одночасно забезпечено нормативний час переходу проїжджої частини пішоходами.

За результатами дослідження було передбачено наступні інженерні рішення:

1) влаштування регульованого пішохідного переходу через пр. Соборності з улаштування острівця безпеки на осі проїзної частини

суттєво покращить безпеку для пішоходів, особливо це стосується в темний період доби;

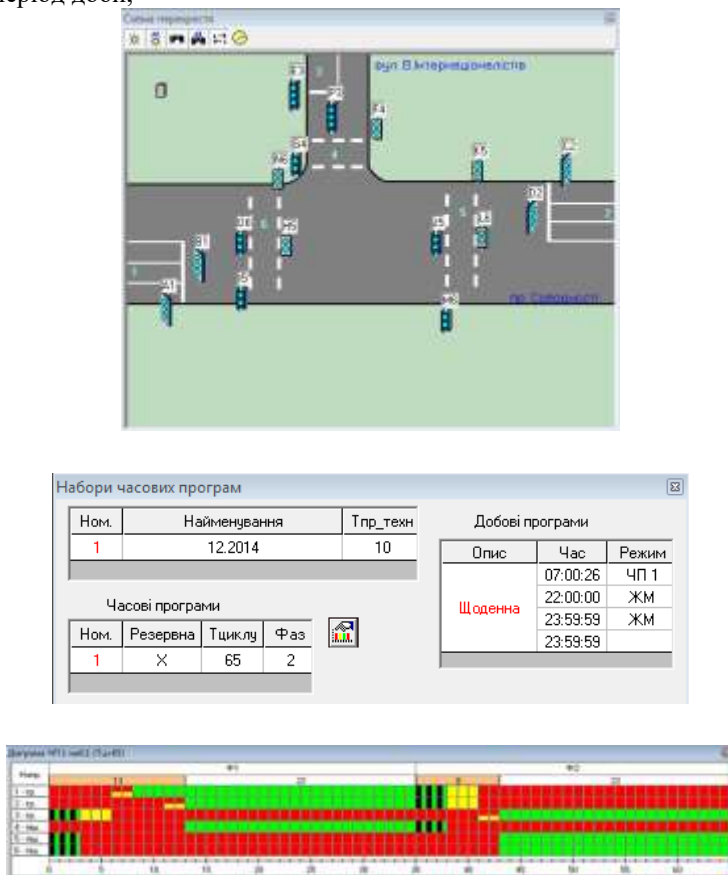


Рис. 3 Циклограма світлофорного регулювання вул. Воїнів-Афганців та пр. Соборності

2) встановлення транспортних і пішохідних світлофорів із пристроями відліку часу дозволить оптимізувати рух транспортних потоків, а також покращить безпеку руху;

3) облаштування тактильної плитки та пониження бортових каменів в межах пішохідного переходу покращить доступність даного об'єкту для маломобільних груп населення;

4) нанесення дорожньої розмітки та встановлення знаків відповідно до нормативних вимог покращить організацію та безпеку дорожнього руху цього транспортного вузла.

Реалізація зазначених заходів сприяє підвищенню безпеки дорожнього руху, зменшенню конфліктних ситуацій та покращенню умов пересування пішоходів.

Висновки

Проведені дослідження дозволили обґрунтувати параметри світлофорного регулювання, що базується на аналізі фактичної інтенсивності транспортних і пішохідних потоків.

Виконання теоретичних розрахунків потоків насичення та фазових коефіцієнтів дозволяє визначити раціональну структуру циклу регулювання. Це дає можливість оптимізувати роботу режимів світлофора та призводить до зменшення затримок в часі для усіх учасників дорожнього руху.

Під час виконання робіт необхідного врахувати потреби маломобільних груп населення, що є обов'язковою складовою сучасного проектування інфраструктури.

Усі згадані запропоновані інженерні рішення забезпечують підвищення рівня безпеки дорожнього руху та ефективність функціонування міської вулично-дорожньої мережі.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Convention on Road Signs and Signals (with Annexes). Concluded at Vienna (1968). <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201091/volume-1091-I-16743-English.pdf>.

2. Dmytrychenko M.F. (2005). Systemology in Transport: Textbook / M.F. Dmytrychenko, Ye.V. Gavrylov, V.K. Dolia. K., 452.
3. Polishchuk V.P. (2014). Organization and regulation of road traffic / V.P. Polishchuk, O.O. Bakulich, O.P. Dziuba, V.I. Yeresov. K., 467.
4. Rossolov, A., Kopytkov, D., Kush, Y., & Zadorozhna, V. (2017). Research of effectiveness of unimodal and multimodal transportation involving land kinds of transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 No. 3 (89), 60–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112356>.
5. Webster F. V. (1958). Traffic Signal Settings. *Road Research Technique Paper No.39*, Road Research Laboratory. London.
6. Papageorgiou, M., Mountakis, K.S., Karafyllis, I., Papamichail, I., Wang, Y. (2021). Lane-free artificial-fluid concept for vehicular traffic, *Proceedings of the IEEE 109*, 114-121. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11642>.
7. Lioris J., Varaiya P., Kurzhanskiy A. (2016). Performance evaluation of alternative traffic signal control schemes for an arterial network by DES approach-overview. *Proceedings of the 9th EUROSIM & the 57th SIMS 271* (Oulu, Finland). [DOI:10.3384/ecp17142265](https://doi.org/10.3384/ecp17142265).
8. Korkmaz G., Ekici E., Özgüner F., Özgüner Ü. (2004). Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems. *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, 76-85.
9. Kareem Othman, Amer Shalaby, Baher Abdulhai (2023). Dynamic Bus Lanes Versus Exclusive Bus Lanes. Comprehensive Comparative Analysis of Urban Corridor Performance. *Transportation Research Record*, Vol. 2677(1) 341–355. <https://doi.org/10.1177/03611981221099517>.
10. Mirchandani P. B., Francis R. L. (1990). Discrete location theory. New York: Wiley, 555. <https://doi.org/10.1002/net.3230240212>.
11. Daganzo C. F. (2003). A Theory of Supply Chains. *Springer Berlin, Heidelberg*, 125. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-18152-8>.
12. Daganzo C. F., Ouyang Y. (2019). Public Transportation Systems: Principles Of System Design, Operations Planning and Real-time Control. Singapore: *World Scientific Publishing Company*. <https://doi.org/10.1142/10553>.
13. DBN V.2.3-5:2018. (2018). Streets and roads of populated areas. K., 55.
14. DSTU 4092:2024. (2024). Road traffic safety. Road traffic lights. General technical specifications. K., 48.
15. Shymchuk O.P., Talakh L.O., Yasiuk I.M., Protsiuk V.O., Rybak T.P. (2020). Application of engineering equipment with improvement of traffic light objects during capital repair of cathedral avenue in Lutsk. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 14, 186-195. [DOI:10.36910/6775-2410-6208-2020-4\(14\)-19](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2020-4(14)-19).

Література

1. Конвенція про дорожні знаки та сигнали (з додатками). Укладена у Відні (1968). <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201091/volume-1091-I-16743-English.pdf>.
2. Дмитриченко М.Ф. (2005). Системологія на транспорті: Підручник / Е.В. Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, В.К. Доля та ін.; за заг. ред М. Ф. Дмитриченка. К., 452.

3. Поліщук В.П. (2014). Організація та регулювання дорожнього руху / В. П. Поліщук, О. О. Бакуліч, О. П. Дзюба, В. І. Єресов та ін.; за заг. ред. В. П. Поліщука. К., 467.
4. Rossolov, A., Kopytkov, D., Kush, Y., & Zadorozhna, V. (2017). Research of effectiveness of unimodal and multimodal transportation involving land kinds of transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 No.3 (89), 60–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112356>.
5. Webster F. V. (2021). Traffic Signal Settings. *Road Research Technique Paper* No.39, Road Research Laboratory. London. 1958.
6. Papageorgiou, M., Mountakis, K.S., Karafyllis, I., Papamichail, I., Wang, Y. (2021). Lane-free artificial-fluid concept for vehicular traffic, *Proceedings of the IEEE* 109, 114-121. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11642>.
7. Lioris J., Varaiya P., Kurzhanskiy A. (2016). Performance evaluation of alternative traffic signal control schemes for an arterial network by DES approach-overview. *Proceedings of the 9th EUROSIM & the 57th SIMS 271*(Oulu, Finland). DOI:10.3384/ecp17142265.
8. Korkmaz G., Ekici E., Özgüner F., Özgüner Ü. (2004). Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems. *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, 76-85.
9. Kareem Othman, Amer Shalaby, Baher Abdulhai (2023). Dynamic Bus Lanes Versus Exclusive Bus Lanes. Comprehensive Comparative Analysis of Urban Corridor Performance. *Transportation Research Record*, 2677(1) 341–355. <https://doi.org/10.1177/03611981221099517>.
10. Mirchandani P. B., Francis R. L. (1990). Discrete location theory. New York: Wiley, 555. <https://doi.org/10.1002/net.3230240212>.
11. Daganzo C. F. (2003). A Theory of Supply Chains. *Springer Berlin, Heidelberg*, 125. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-18152-8>.
12. Daganzo C. F., Ouyang Y. (2019). Public Transportation Systems: Principles Of System Design, Operations Planning and Real-time Control. Singapore: *World Scientific Publishing Company*. <https://doi.org/10.1142/10553>.
13. ДБН В.2.3-5:2018. (2018). Вулиці та дороги населених пунктів. К., 55.
14. ДСТУ 4092:2024. (2024). Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні умови. К., 48.
15. Шимчук О.П., Талах Л.О., Ясюк І.М., Процюк В.О., Рибак Т.П. (2020). Застосування інженерного обладнання з удосконаленням світлофорних об'єктів при капітальному ремонті проспекту Соборності у м. Луцьку. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 14, 186-195. DOI:10.36910/6775-2410-6208-2020-4(14)-19.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.05.2026	Received 14.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 16.05.2026	Received in revised form 16.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

V. O. Protsiuk*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2644-9490>
Department of Building and Infrastructure Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

I. M. Yasiuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2087-594X>

Department of Building and Infrastructure Engineering

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

O. P. Shymchuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0564-2673>

Department of Building and Infrastructure Engineering

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

M. V. Bodak

Assistant, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>

Department of Automotive Transport

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: v.protsiuk@lutsk-ntu.com.ua

Justification of traffic light regulation parameters as an engineering arrangement of streets and roads for the organization of traffic on a city street

How to Cite:

Protsiuk, V. O., Yasiuk, I. M., Shymchuk, O. P., Bodak, M. V. (2026). Justification of traffic light regulation parameters as an engineering arrangement of streets and roads for the organization of traffic on a city street. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 213-225. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-16)

Abstract. The article considers the issue of substantiating the parameters of traffic light regulation and improving the organization of road traffic on a city highway with intensive transport and pedestrian traffic. Particular attention is paid to increasing the efficiency of the functioning of a controlled intersection in conditions of significant intensity of traffic flows and high concentration of pedestrian traffic, which is characteristic of the modern city street and road network, especially for residential areas.

A comprehensive analysis of the planning characteristics of the studied area, the geometric parameters of the roadway, the conditions of vehicles movement and pedestrians, as well as the features of the organization of traffic within the intersection, was carried out.

In the process of scientific research, an assessment of the traffic flows intensity and pedestrian traffic by direction was performed, saturation flows were determined for individual lanes and phase coefficients were calculated, which made it possible to establish rational parameters for the operation of the traffic light facility. Based on the results obtained, the optimal duration of the traffic light regulation cycle was calculated, and the time parameters of individual phases and intermediate cycles were determined, considering the requirements of road safety, the capacity of the intersection and the need to ensure safe crossing of the carriageway by pedestrians.

When developing measures to improve road traffic management, the needs of low-mobility population groups were taken into account, in particular, the requirements for the accessibility of pedestrian infrastructure and sufficient duration of pedestrian intervals. Engineering and organizational solutions were proposed, aimed at reducing traffic delays, increasing the level of safety for all road users, and the operation modes of traffic light regulation were optimized and more comfortable and safe travel conditions were created for all categories of users of the street and road network.

Keywords: traffic light regulation, traffic organization, phase coefficient, saturation flow, regulation cycle, traffic safety.

УДК 711.4:712

І.О. Парфентьєва *

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6116-4509>

Кафедра архітектури та містобудування

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Ю. А. Мельник

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5186-7032>

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, проспект Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

М.Р. Новосад

студент,

Кафедра будівництва та інфраструктурної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. В. Верешко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1892-1153>

Кафедра архітектури та містобудування

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, 43018

П. О. Сунак

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2405-3380>

Кафедра будівництва та інфраструктурної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: innaparfentyeva@gmail.com

Методи реконструкції зелених зон у житлових кварталах щільної забудови: інклюзивний підхід (на прикладі кварталу Гуща в м. Луцьку)

Цитувати як:

Парфентьєва, І.О., Мельник Ю.А., Новосад М.Р., Верешко О. В., Сунак П. О., (2026). Методи реконструкції зелених зон у житлових кварталах щільної забудови: інклюзивний підхід (на прикладі кварталу Гуща в м. Луцьку). *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 25, 226-237. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-17](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-17)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

На сьогодні стратегічна реновація та комплексне розширення ландшафтно-рекреаційної інфраструктури в межах міської забудови України набули критичного значення. Повномасштабна військова агресія спричинила стрімке зростання кількості громадян – як ветеранів війни, так і цивільного населення, які потребують тривалого відновлення та якісної інклюзивної реабілітації безпосередньо в межах житлових громад. Існуюча мережа зелених зон загального користування у спальних районах, зокрема у кварталах зі щільною забудовою, демонструє невідповідність сучасним вимогам безбар'єрності та ергономічним запитам, що зумовлює гостру потребу у впровадженні системних підходів до модернізації публічних просторів.

У роботі досліджується актуальність ревіталізації рекреаційного каркаса міських кварталів, зокрема аналізуються виклики, пов'язані з дефіцитом інклюзивного середовища та занедбаністю прибудинкових територій. На прикладі кварталу Гуца у місті Луцьку, який в умовах високої щільності забудови відчуває критичне навантаження на зелені насадження, обґрунтовуються перспективи формування мультифункціональних зон реабілітації. Особлива увага приділяється принципам просторово-планувальної організації, створенню терапевтичних ландшафтів та адаптації існуючих просторів, адаптованих до потреб маломобільних груп населення.

Реконструкція зелених зон, що базується на принципах трансформативності та мультифункціональності, дозволяє оперативно адаптувати функціональне призначення території до динамічних запитів мешканців, від активної фізичної реабілітації до спокійного психологічного відновлення. Впровадження екологічно орієнтованих рішень, зокрема «міських городів» та вертикального озеленення, слід розглядати не як разовий благоустрій, а як довгострокову соціальну інвестицію. Така стратегія не лише гарантує забезпечення конституційного права на гідне та доступне середовище для кожного постраждалого, а й значно підвищує резистентність (стійкість) міської системи охорони здоров'я та соціального захисту.

Результати дослідження підтверджують, що науково обґрунтована модернізація рекреаційних зон кварталу Гуца сприяє формуванню комплексного відновлювального середовища, яке інтегрує фізичну та психоемоційну складові реабілітації. Це дозволяє не лише оптимізувати процеси відновлення, а й забезпечити повноцінну соціальну інтеграцію пацієнтів, покращити якість їхнього повсякденного життя та зміцнити соціальну згуртованість у межах житлової громади.

Ключові слова: містобудівна реконструкція, інклюзивність, зелені зони, квартал Гуца, мультифункціональний простір, реабілітаційне середовище, доступність, програмний комплекс QGIS.

Вступ

В умовах повномасштабної війни стратегічна реновація ландшафтно-рекреаційної інфраструктури України стала обґрунтованою стратегічною необхідністю через різке зростання кількості ветеранів та цивільних, які потребують якісної інклюзивної реабілітації безпосередньо в межах житлових громад. Наявні зелені зони у кварталах щільної забудови демонструють критичну невідповідність нормам безбар'єрності та сучасним ерготерапевтичним запитам.

Метою дослідження є розробка архітектурно-планувальних рішень для реконструкції зелених зон кварталу Гуца в м. Луцьку на засадах біокліматичного проєктування та інклюзивності. Такий підхід дозволяє трансформувати занедбані «сірі зони» у багатофункціональні рекреаційні простори, що сприяють фізичному та психоемоційному відновленню мешканців і формуванню стійкого міського середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасної наукової літератури свідчить про те, що реконструкція зелених зон у щільно забудованих житлових кварталах вимагає переходу від традиційного благоустрою до комплексного сталого та інклюзивного проєктування, яке враховує кліматичні виклики та соціальні потреби

мешканців [1-4]. Сучасна реконструкція зелених зон у щільній забудові має базуватися на синергії екологічних технологій (Sponge city, біокліматизм) та соціальних практик (урбан-фермерство, інклюзивні простори). Це дозволяє створювати архітектурне середовище, яке одночасно є стійким до змін клімату та комфортним для всіх верств населення.

Відповідно до [5-8] проблематика інклюзивності збудованого середовища трансформувалася з вузькоспеціалізованого питання в обґрунтовану стратегічну необхідність, особливо в контексті відновлення України. Це корелюється з міжнародними стандартами безбар'єрності (ISO 21542:2025, EN 17210:2021), де акцент зміщується з суто технічних параметрів (пандуси, підйомники) на створення цілісного безбар'єрного ландшафту.

Незважаючи на наявність ґрунтовної теоретичної бази, сучасний стан рекреаційних зон житлових масивів Луцька часто не відповідає принципам біокліматичного та інклюзивного проектування. Аналіз кварталу Гуца, проведений у межах даного дослідження, виявив декілька системних проблем:

- низький рівень архітектурної інклюзивності: більшість територій кварталу не відповідають сучасним критеріям доступності; відсутність адаптивного обладнання та безбар'єрних зв'язків унеможливує використання цих зон для соціалізації та реабілітації ветеранів війни.

- функціональна стагнація – рекреаційні простори залишаються одноваріантними, що суперечить концепції стійкого міста; виникає гостра потреба у впровадженні мультифункціональних елементів, таких як активні та пасивні зони відпочинку, що дозволять одночасно вирішувати екологічні та соціальні завдання.

Мета і завдання дослідження полягають у розробці архітектурно-планувальних рішень для реконструкції зелених зон кварталу Гуца на засадах біокліматичного проектування та інклюзивності. Це дозволить трансформувати занедбані ділянки у стійке рекреаційне середовище, здатне забезпечити фізичне та ментальне відновлення мешканців у гармонії з природними факторами міської території.

Матеріали та методи

У процесі дослідження було застосовано комплексний науковий підхід, що базується на поєднанні методів картографічного моделювання, біокліматичного, просторово-планувального та системного аналізу.

Реконструкція ландшафтно-рекреаційного каркасу кварталу Гуца згідно з принципами сталого розвитку розглядається як стратегія формування стійкого міського середовища. Це передбачає не лише

відновлення біопотенціалу територій, а й кардинальне покращення екологічних та соціальних показників житлового району.

Екологічна стійкість у межах кварталу досягається шляхом впровадження методів біокліматичного проектування, що дозволяє нівелювати негативний вплив мезоклімату висотної забудови [1]. Використання вертикального озеленення забезпечує покращення мікроклімату території, зниження інтенсивності прояву ефекту «теплого острова» та зменшення антропогенного навантаження на міське середовище

Соціальна стійкість проекту ґрунтується на обов'язковому впровадженні принципів інклюзивного дизайну та безбар'єрності. Згідно з концепцією, розвиток інклюзивності збудованого середовища є критичним фактором соціальної адаптації в сучасній Україні [2,9]. У контексті кварталу Гуца це реалізується через гарантування безперешкодного доступу до всіх рекреаційних зон, створення спеціалізованих локацій для ерготерапії (міські городи) та облаштування мультифункціональних просторів, що сприяють психоемоційному відновленню ветеранів та зміцненню соціальної згуртованості громади.

Таким чином, реновація, керована цими принципами, перетворює фрагментарні зелені насадження на високопродуктивне та комфортне реабілітаційне середовище, яке є економічно та соціально життєздатним у довгостроковій перспективі.

Важливим практичним орієнтиром для впровадження інклюзивних стандартів в Україні є досвід реалізації національних проектів реабілітаційної інфраструктури, таких як мережа RECOVERY. Хоча більшість таких центрів функціонують на базі державних медичних закладів [9], ідеологія їхнього внутрішнього планування та технічного оснащення стає методологічною основою для формування зовнішнього реабілітаційного простору («терапевтичних ландшафтів») безпосередньо в межах житлових кварталів.

Результати та обговорення

Для аналізу кварталу Гуца у місті Луцьк використовувалися геоінформаційного програмного комплексу QGIS (рис. 1).

Відповідно до результатів аналізу було встановлено:

- Концентрація забудови у північній та центральній частинах кварталу. Це зони максимального антропогенного тиску, де висока поверховість поєднується із мінімальною площею відкритих ґрунтів.
- Зелені насадження розташовані переважно периферійно або фрагментарно всередині дворів. Більшість насаджень мають стихійний характер і не утворюють цілісної екосистеми.

- Великі площі забудови без достатнього озеленення сприяють утворенню «теплових пасток».
- На карті чітко простежуються «сірі зони», занедбані ділянки які на даний момент не виконують жодної функції. Відповідно ці території є стратегічними для розвитку інклюзивності.



Рис.1. Просторовий аналіз поверховості забудови та зелених насаджень кварталу Гуша

Враховуючи дані Qgis аналізу була вибрана ділянка для подальшої ревіталізації та створення мультифункціонального скверу реабілітації (рис.2.).

Дана ділянка розташована в парку льоно-шовкового комбінату (синій прямокутник) та знаходиться біля майбутнього ветеранського хабу (жовтий прямокутник).



Рис. 2. Ситуаційна схема ділянки на мапі.

При плануванні даного скверу ключовою задачею було створити простір для комфорту та духовного відновлення ветеранів.

На основі аналізу існуючого стану даного парку було проведено зонування території де корисний простір був розділений на активні та пасивні зони (рис.3.).

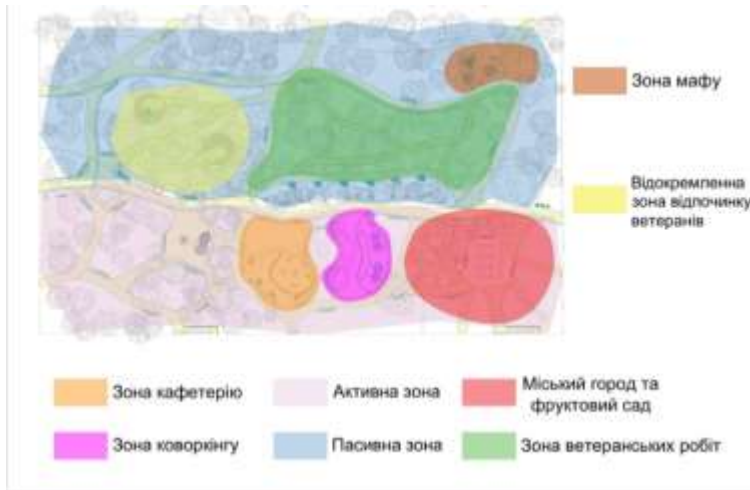


Рис. 3. Зонування території

Активний простір є спеціально організованою частиною рекреаційної зони, насиченою елементами, що стимулюють рухову активність, розвиток моторики та координації. З урахуванням контексту кварталу Гуща та принципів інклюзивності така зона трансформується у середовище активної соціалізації, що сприяє соціальній адаптації ветеранів, їх інтеграції у громадський простір та зниженню рівня психологічної ізоляції.

Пасивний простір, у свою чергу, сформований з урахуванням потреб у тиші та психологічному комфорті й орієнтований на психоемоційну реабілітацію, ментальне відновлення та зниження рівня емоційного напруження мешканців і ветеранів.

Між активною та пасивною зонами передбачена буферна зелена смуга, яка забезпечує їх функціональне розмежування, знижує рівень візуального й акустичного впливу та сприяє формуванню комфортного рекреаційного середовища. (рис.4.).



Рис. 4. Ізолююча зелена смуга

Міські городи та фруктовий сад виступають не просто як елементи озеленення, а як інструменти активної соціальної та фізичної реабілітації. На відміну від декоративних клумб міські городи дозволяють ветеранам та людям із порушенням моторики залучатись до ерготерапії, що в свою чергу допомагає долати бар'єри ізоляції та стимулює взаємодію між мешканцями і ветеранами (рис.5).



Рис. 5. Міські городи та фруктовий сад.

Якщо в центрах RECOVERY пацієнти відновлюють навички в приміщенні, то в проєкті це виноситься у ландшафт. Використання піднятих грядок (висотою 60-80 см) забезпечує безбар'єрний доступ для людей на кріслах колісних, дозволяючи їм працювати без сторонньої допомоги [11]. В свою чергу це допомагає відволіктись від зовнішніх проблем та дратівливих факторів середовища.

Також при розробці плану скверу відведене місце для виставки робіт ветеранів. Простір слугує «провідником» між ветеранами та

громадою кварталу що в свою чергу демонструє результати творчості (арт-терапії) ветеранів і дозволяє повернути відчуття значущості та інтегруватися в культурне життя Луцька. Це не просто зона зі скульптурами, а простір суспільної пам'яті та підтримки, спрямований на гідне вшанування захисників, формування поваги до їхнього досвіду та створення психологічно комфортного середовища для взаємодії з громадою (рис.5.).



Рис. 6. Простір ветеранських робіт (один із можливих варіантів).

Висновки

У ході дослідження було успішно розроблено концепцію відновлення міжбудинкового рекреаційного простору кварталу Гуща в Луцьку, яка базується на принципах сталого розвитку, інклюзивності та біокліматичного проектування. Проведені дослідження продемонстрували ефективну модель реформування депресивних та занедбаних ділянок («сірих зон») у мультифункціональне середовище, здатне забезпечити ментальне та фізичне відновлення як ветеранів, так і мешканців громади.

Науково обґрунтована модернізація рекреаційних зон сприяє створенню середовища, яке інтегрує фізичну та психоемоційну складові реабілітації. Це дозволяє оптимізувати процеси відновлення та забезпечити повноцінну соціальну інтеграцію пацієнтів.

Впровадження інклюзивних та екологічно орієнтованих рішень (наприклад, міських городів та вертикального озеленення) слід розглядати як довгострокову соціальну інвестицію. Така стратегія не лише гарантує право на доступне середовище, а й зміцнює резистентність міської системи охорони здоров'я та соціального захисту.

Реконструкція, заснована на принципах трансформативності, дозволяє оперативно адаптувати територію до динамічних запитів

мешканців: від зони активної соціалізації та ерготерапії до пасивних зон психоемоційного відновлення та спокою.

Створення спеціалізованих просторів, таких як локації для виставок робіт ветеранів або «міські городи», сприяє подоланню соціальної ізоляції, поверненню відчуття значущості ветеранам та зміцненню зв'язків усередині житлової громади.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи використовували технології штучного інтелекту (візуалізації простору скверу).

References

1. Kryvenko, O. (2021). Determining the directions of designing bioclimatic high-rise buildings in the formation of a sustainable urban environment. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.290-298>
2. Timashkov, Maksym Petrovych. Innovative approaches to the formation of the architectural environment in the context of global climate change: aspects of practical experience analysis. International Science Journal of Engineering & Agriculture, Vol. 3, No. 4, 2024, pp. 1–8. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240304.1>
3. Akar, U., Doraj, P., Yilmaz, S. (2020). Concept in sustainable architecture and critical approaches on the ecological effect. The Journal of International Social Research, 13(69). <http://dx.doi.org/10.17719/jisr.2020.3988>
4. Synko, B., Ogarenko, Yu. Reconstruction and improvement of green zones: where to start and how to successfully implement the project: handbook for local authorities and communities / edited by V. Yurkiv. Kyiv, 2021. 98 p. URL: https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/749/DOBRE_2021_Handbook_on_green_zones_final_for_web_small.pdf
5. Kryvomaz, T.I., Ilchenko, I.S., Tsyba, A.M., Khamotskyi, R.O., & Hetman, Yu.A. (2024). Research on the development of inclusivity of the built environment in Ukraine. Ecological Safety and Natural Resources, 50(2), 6–18. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.6-18>

6. Rebernik, N., Szajczyk, M., Bahillo, A., Goličnik Marušić, B. (2020). Measuring disability inclusion performance in cities using disability inclusion evaluation tool (DIETool). Sustainability, 12(4), 1378.
7. Korngold, D., Lemos, M., Rohwer, M. Smart Cities for All: A Vision for an Inclusive Accessible Urban Future. AT&T, 2017. Available online: <https://g3ict.org/publication/smart-cities-for-all-a-vision-for-an-inclusiveaccessible-urban-future>
8. DBN V.2.2-40:2018. Inclusivity of buildings and structures. Basic provisions.
9. Stepaniuk, V.O., Parfentjeva, I.O., Zadorozhnikova, I.V. (2025). Sustainable and inclusive development of rehabilitation centers: prospects for expansion on the example of NGO “AGAPE-UKRAINE”. Modern Technologies and Methods of Calculations in Construction, 24, 505–515. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-43](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-43)
10. Recovery Project URL: <https://recoveryua.org/pro-proekt>
11. Therapeutic Landscapes: Evidence-Based Resources for Healing Gardens. URL: <https://healinglandscapes.org/gardens-overview/community-gardens/>

Література

1. Кривенко, О. (2021). Визначення напрямів проєктування біокліматичних висотних будівель при формуванні стійкого міського середовища. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.290-298>
2. Тіماشков Максим Петрович. Інноваційні підходи формування архітектурного середовища в умовах глобальних змін клімату: в аспектах аналізу практичного досвіду. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 3, No. 4, 2024, pp. 1-8. <https://doi.org/10.46299/j.isjsea.20240304.1>
3. Akar, U., Doraj, P., Yilmaz, S. (2020). Concept in sustainable architecture and critical approaches on the ecological effect. The journal of international social research, 13(69). doi: <http://dx.doi.org/10.17719/jisr.2020.3988>
4. Синько Б., Огаренко Ю. Реконструкція та благоустрій зелених зон: з чого почати та як успішно втілити проєкт : посібник для місцевої влади та громадськості / за заг. ред. В. Юрківа. Київ, 2021. 98 с. URL: https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/749/DOBRE_2021_Handbook_on_green_zones_final_for_web_small.pdf?utm_source=copilot.com
5. Кривомаз, Т.І., Ільченко, І.С., Циба, А.М., Хамоцький, Р.О. та Гетьман, Ю.А. (2024). Дослідження розвитку інклюзивності забудованого середовища в Україні. Екологічна безпека та природні ресурси, 50 (2), 6–18. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.6-18>
6. Rebernik N., Szajczyk M., Bahillo A., Goličnik Marušić B. Measuring disability inclusion performance in cities using disability inclusion evaluation tool (DIETool). – Sustainability. – 2020. – №12.4. – P. 1378.
7. Korngold, D.; Lemos, M.; Rohwer, M. Smart Cities for All: A Vision for an Inclusive Accessible Urban Future. AT&T: 2017. Available online: <https://g3ict.org/publication/smart-cities-for-all-a-vision-for-an-inclusiveaccessible-urban-future>

8. ДБН В.2.2-40:2018 Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення.

9. Степанюк, В.О., Парфентьева, І.О., Задорожнікова, І.В. (2025). Сталій та інклюзивний розвиток реабілітаційних центрів: перспективи розширення на прикладі ГО «АГАПЕ-УКРАЇНА». Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 24, 505-515. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-43](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-43)

10. Про проєкт Recovery URL: <https://recoveryua.org/pro-proekt>

11. Therapeutic Landscapes: Evidence-Based Resources for Healing Gardens. URL: <https://healinglandscapes.org/gardens-overview/community-gardens/>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 15.05.2026	Received 15.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 18.05.2026	Received in revised form 18.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

I.O. Parfentieva*

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6116-4509>
Department of Architecture and Urban Planning
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska Street, Lutsk, Ukraine, 43018

Yu.A. Melnyk

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5186-7032>
Department of Geodesy, Land Management and Cadastre
Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli Avenue, Lutsk, Ukraine, 43025

M.R. Novosad

Student
Department of Construction and Infrastructure Engineering
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska Street, Lutsk, Ukraine, 43018

O.V. Vereshko

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1892-1153>
Department of Architecture and Urban Planning
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska Street, Lutsk, Ukraine, 43018

P.O. Sunak

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2405-3380>
Department of Construction and Infrastructure Engineering
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska Street, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: innaparfentyeva@gmail.com

Methods of Green Zone Reconstruction in High-Density Residential Blocks: An Inclusive Approach (Case Study of the Hushcha Block in Lutsk)

How to Cite:

Parfentieva, I.O., Melnyk, Yu.V., Novosad, M.R., Vereshko, O.V., Sunak, P.O. (2026). Methods of Reconstruction of Green Areas in Residential Quarters of Dense Development: An Inclusive Approach (on the Example of the Hushcha Quarter in Lutsk). *Modern technologies and*

Abstract. Today, the strategic renovation and comprehensive expansion of landscape and recreational infrastructure within Ukraine's urban areas have become of critical importance. Full-scale military aggression has led to a rapid increase in the number of citizens – both war veterans and civilians – who require long-term recovery and high-quality, inclusive rehabilitation directly within residential communities. The existing network of public green spaces in residential areas, particularly in densely built-up neighborhoods, fails to meet modern accessibility standards and occupational therapy needs, creating an urgent need for systematic approaches to modernizing public spaces.

This study examines the urgent need to revitalize the recreational framework of urban neighborhoods, specifically analyzing the challenges associated with the lack of an inclusive environment and the neglect of areas adjacent to residential buildings. Using the example of the Hushcha neighborhood in Lutsk, which, due to high building density, faces critical pressure on its green spaces, the paper justifies the prospects for creating multifunctional rehabilitation zones. Particular attention is paid to the principles of spatial planning, the creation of therapeutic landscapes, and the integration of existing spaces adapted to the needs of people with limited mobility.

The redevelopment of green spaces, based on the principles of transformability and multifunctionality, allows for the rapid adaptation of a site's functional purpose to the dynamic needs of residents, ranging from active physical rehabilitation to peaceful psychological recovery. The implementation of environmentally oriented solutions, in particular "urban gardens" and vertical greening, should be viewed not as a one-time improvement but as a long-term social investment. Such a strategy not only guarantees the constitutional right to a dignified and accessible environment for every affected person but also significantly increases the resilience of the urban healthcare and social protection system.

The study's findings confirm that the scientifically grounded modernization of recreational areas in the Hushcha neighborhood contributes to the creation of a comprehensive restorative environment that integrates the physical and psycho-emotional components of rehabilitation. This not only optimizes recovery processes but also ensures the full social integration of patients, improves the quality of their daily lives, and strengthens social cohesion within the residential community.

Keywords: urban reconstruction, inclusiveness, green zones, Hushcha block, multifunctional space, rehabilitation environment, accessibility, QGIS software package

УДК 69.059:697.1:628.8:620.9

О. Г. Добровольська

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1337-7216>

Кафедра міського будівництва і архітектури

Запорізький національний університет, просп. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006

О. М. Фостащенко*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4287-2838>

Кафедра міського будівництва і архітектури

Запорізький національний університет, просп. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006

*автор-кореспондент, e-mail: zdia207@gmail.com

Удосконалена методика реконструкції інженерного обладнання індивідуальних будинків, пошкоджених внаслідок воєнних дій

Цитувати як:

Добровольська, О. Г., Фостащенко, О. М. (2026). Удосконалена методика реконструкції інженерного обладнання індивідуальних будинків, пошкоджених внаслідок воєнних дій.

Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 25, 238-253.

[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-18)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розглянуто питання вдосконалення методики реконструкції інженерного обладнання пошкоджених будинків із впровадженням енергоощадних технологій. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю модернізації будівельного фонду України в умовах повоєнного відновлення, зниження енергоспоживання та скорочення експлуатаційних витрат. Особливу увагу приділено модернізації систем теплостачання та оцінці доцільності використання сучасного теплогенерувального обладнання. Об'єктом дослідження є методика реконструкції інженерного обладнання індивідуального двоповерхового будинку. Предметом дослідження визначено методи підвищення енергоефективності системи опалення шляхом модернізації обладнання та застосування енергоощадних технологій. У роботі використано комплексний підхід, що включає аналіз технічного стану будівлі, оцінку енергетичних показників і порівняльний аналіз варіантів теплостачання. У результаті дослідження встановлено, що система теплостачання будинку втратила працездатність унаслідок пошкодження котельного обладнання, а природна вентиляція спричиняє значні тепловтрати та підвищене енергоспоживання. Розрахункове теплове навантаження будинку становить близько 14 кВт, а орієнтовне річне споживання теплової енергії – 18 тис. кВт-год. У роботі розглянуто чотири варіанти систем опалення: водяну теплу підлогу з електричним котлом, твердопаливним котлом, тепловим насосом, сонячну станцію та електричну підлогу. Порівняльний аналіз показав, що система з електричним котлом має

найвищі експлуатаційні витрати, а використання твердопаливного котла потребує постійного технічного обслуговування. Найбільш доцільним варіантом визначено систему з тепловим насосом, яка забезпечує зниження витрат на енергоресурси та підвищення енергоефективності тепlopостачання.

Ключові слова: реконструкція будівель, інженерне обладнання, система опалення, тепловий насос, енергоощадність.

Вступ

Реконструкція інженерного обладнання житлових будинків є важливим напрямом сучасного будівництва та експлуатації об'єктів. Особливого значення в умовах воєнних пошкоджень та післявоєнного відновлення будинків набуває технічне обстеження інженерних систем та обладнання, що дозволяє своєчасно виявляти пошкодження, оцінювати технічний стан інженерного обладнання, визначати доцільність подальшої експлуатації, реконструкції або модернізації. Зростання вимог до енергоефективності, надійності та безпеки інженерних систем зумовлює необхідність впровадження сучасних енергоощадних технологій і засобів моніторингу технічного стану обладнання. Комплексний підхід до реконструкції пошкоджених індивідуальних будинків із застосуванням сучасних технологій сприяє підвищенню експлуатаційної надійності об'єктів, подовженню строку служби обладнання та зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. В умовах воєнних дій процес відновлення, реконструкції та модернізації будівельного фонду України набуває системного та довготривалого характеру. Особливо актуальною є реконструкція пошкоджених будинків. Реконструкція на відміну від нового будівництва, дозволяє значно скоротити витрати матеріальних ресурсів, зменшити навантаження на довкілля та прискорити відновлення зруйнованих об'єктів [1]. Сучасні підходи до реконструкції інженерного обладнання будинків передбачають не лише відновлення пошкоджених систем, але і їх глибоку модернізацію з впровадженням енергоефективних технологій та відновлювальних джерел енергії [2], що відповідає сучасним нормативним вимогам до енергоспоживання та ефективності будинків, а також модернізації систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря у поєднанні з оновленими вимогами енергоефективності під час реконструкції будинків [3]. Інтеграція цифрових технологій, автоматизованих систем управління та відновлюваних джерел енергії створює передумови для переходу до концепції «розумних будівель» у процесі реконструкції житлового фонду [4]. У світовій та вітчизняній науковій практиці активно досліджуються питання енергоефективної реконструкції будинків та модернізації

інженерних систем. Увага приділяється комплексному підходу до зниження енергоспоживання будинків шляхом поєднання архітектурних, конструктивних та інженерних рішень. Автори [5] вважають, що застосування концепції інтелектуальних енергетичних систем у поєднанні з проектуванням та інтеграцією відновлювальних джерел енергії створює основу для підвищення ефективності функціонування будинків та зниження їх енергоспоживання. Зокрема, у дослідженні [6] обґрунтовано, що модернізація інженерних систем будинків (опалення, вентиляції та кондиціонування) може забезпечити зниження енергоспоживання до близько 30 % і більше за умови впровадження автоматизованих систем управління та енергоощадного обладнання. Автори [7] підкреслюють, що значна частка втрат енергії пов'язана саме з неефективною роботою цих систем. При цьому доведено, що навіть за обмеженої виміральної інфраструктури застосування аналітичних підходів до обробки даних загальнобудинкових лічильників дозволяє виявляти потенціал енергоощадності шляхом оптимізації, режимів роботи та графіків функціонування систем. Важливим напрямом є застосування відновлювальних джерел енергії у реконструкції будинків. У роботі [8] доведено, що використання теплових насосів у будинках дозволяє суттєво зменшити залежність від традиційних енергоресурсів і скоротити викиди парникових газів. Дослідження [9] підтверджує, що поєднання різних типів відновлювальних джерел енергії (сонячної, геотермальної енергії) у складі гібридних систем є одним із найбільш перспективних рішень для реконструкції будинків. Крім того, значна увага приділяється оцінці ефективності заходів з термомодернізації. У роботі [10] встановлено, що комплексна модернізація огорожувальних конструкцій разом з оновленням інженерних систем є найбільш ефективною стратегією з погляду енергоощадності та економічної доцільності. Водночас автори [11] акцентують на необхідності врахування життєвого циклу будинків та впливу реконструкції на довкілля. Окремий напрям досліджень стосується цифровізації процесів експлуатації будинків. Як зазначено у [12], застосування технологій дистанційного моніторингу, сенсорних мереж та автоматизованих систем контролю дозволяє підвищити ефективність управління технічним станом будинків і своєчасно виявляти можливі пошкодження конструкцій та інженерних систем. У роботі [13] підкреслюється, що інтеграція цифрових інформаційних платформ та інтелектуальних систем у процес реконструкції є важливим фактором забезпечення сталого розвитку будівельного сектору, підвищення експлуатаційної надійності та ефективності управління об'єктами. Сучасні нормативні документи у сфері енергоефективності та технічної експлуатації будинків переважно регламентують вимоги до проектування,

модернізації та оцінки енергетичних показників об'єктів, однак недостатньо враховують особливості технічного обстеження інженерних систем пошкоджених будинків. В умовах зростання кількості руйнувань забудови особливої актуальності набуває оперативність оцінки технічного стану інженерного обладнання та мереж для прийняття обґрунтованих рішень щодо можливості їх подальшої експлуатації, реконструкції або повного відновлення. У зв'язку з цим виникає потреба у вдосконаленні методики технічного обстеження інженерних систем і обладнання будинків, яка повинна забезпечувати комплексний аналіз ступеня пошкоджень, визначення пріоритетності відновлювальних заходів та можливість швидкого впровадження технічних рішень в умовах війни.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження – вдосконалення методики реконструкції інженерних систем та обладнання будинків, пошкоджених внаслідок воєнних дій, з урахуванням ступеня пошкодження конструктивних та інженерних елементів, а також розробки науково обґрунтованих підходів до їх подальшого відновлення та модернізації з впровадженням енергоефективних технологій і відновлюваних джерел енергії. Для досягнення мети передбачено обґрунтування основних етапів технічного обстеження об'єктів, аналізу технічного стану інженерних систем та оцінки можливості їх подальшої експлуатації або реконструкції. У процесі дослідження передбачається отримання практично орієнтованих результатів щодо визначення пріоритетних заходів відновлення інженерного обладнання будинків, підвищення рівня енергоефективності систем теплопостачання, водопостачання й енергозабезпечення в умовах війни та післявоєнного відновлення обладнання будівель у прифронтових регіонах України.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі задачі:

- аналіз сучасних підходів до реконструкції обладнання пошкоджених будинків в Україні та за кордоном з акцентом на модернізацію інженерних систем та підвищення енергоефективності;
- обґрунтування доцільності використання відновлюваних джерел енергії (теплових насосів) в процесі реконструкції;
- визначення ефективних технічних рішень з модернізації систем теплопостачання з урахуванням чинних нормативних вимог;
- оцінка потенціалу зниження енергоспоживання та підвищення експлуатаційної ефективності будинків у результаті запропонованих заходів.

Об'єктом дослідження є методика реконструкції інженерного обладнання індивідуального двоповерхового будинку з впровадженням енергоощадних технологій та систем цифрового моніторингу, а предметом дослідження – методи підвищення енергоефективності системи опалення

будинку шляхом модернізації інженерного обладнання та використання відновлюваних джерел енергії.

Матеріали та методи

Дослідження виконано із застосуванням комплексного підходу: аналізом нормативної бази, сучасних наукових публікацій і практичних рішень у сфері реконструкції інженерних систем будинків, методів енергетичного аналізу та техніко-економічного оцінювання ефективності впроваджуваних заходів. Інформаційною основою дослідження є чинні нормативи України у сфері енергоефективності будівель, проектування систем опалення, вентиляції, водопостачання та каналізації, міжнародні наукові дослідження, присвячені модернізації будинків та впровадженню відновлюваних джерел енергії. Удосконалено методикою досліджень передбачено виконання чотирьох етапів, детально розглянутих нижче.

Опис об'єкта після реконструкції, на якому реалізовано удосконалену методику. Об'єкт – двоповерховий пошкоджений будинок прямокутної конфігурації у плані. Конструктивна схема передбачає плоске покриття з рулонною гідроізоляцією, яке не використовується для експлуатаційних потреб. Габаритні розміри першого поверху будинку в координаційних осях становлять $11,4 \times 7,2$ м, другого поверху – $10,3 \times 9$ м. Планувальні та конструктивні особливості об'єкта враховано при розробленні рішень стосовно модернізації інженерного обладнання та впровадження енергоефективних технологій.

Результати та обговорення

Розробка удосконаленої методики, що пропонується для відновлення індивідуального житла, пошкодженого внаслідок воєнних дій апробована на пілотному проєкті, який у даному дослідженні виступає прикладом прийнятих рішень – реконструкція пошкодженого внаслідок воєнних дій індивідуального житлового будинку, розташованого в селищі Комишуваха Запорізького району з модернізацією його інженерного обладнання (рис. 1), оскільки наявні пошкодження даного будинку є характерними для прифронтових населених пунктів України.

Удосконалена методика досліджень має чотири послідовні етапи (рис. 2) та передбачає комплексний підхід до реконструкції пошкодженого внаслідок воєнних дій індивідуального житлового будинку з модернізацією його інженерного обладнання.

Прийнятий у методиці комплексний підхід спирається на послідовність та етапність виконання досліджень згідно з нормативними вимогами (їх обсяг залежить від особливостей пошкоджень), що забезпечує чіткість, оперативність, ефективність прийняття проєктних

рішень, а також – управлінських рішень місцевих органів влади (особливо – при потребі одночасного відновлення великої кількості пошкоджених будинків).



Рис. 1. Загальний вигляд пошкодженого будинку, що розглядається як об'єкт реконструкції та модернізації інженерного обладнання



Рис. 2. Етапи методики реконструкції інженерного обладнання індивідуальних будинків, пошкоджених внаслідок воєнних дій

На етапі 1 проводиться обстеження технічного стану будинку і його інженерного обладнання. Оцінка здійснюється на основі аналізу конструктивних характеристик, інженерних мереж, режимів експлуатації і фактичного рівня енергоспоживання. Основну увагу приділяється визначенню технічного стану інженерних систем (наприклад – опалення) і виявленню факторів, що впливають на ефективність їх роботи відповідно до вимог нормативних документів у сфері енергоефективності будівель, опалення та обстеження технічного стану будівель і споруд [1–3, 14].

Етап 2 передбачає розгляд можливих варіантів модернізації інженерного обладнання будинку із застосуванням енергоефективних рішень. Основна увага приділяється аналізу варіантів систем опалення та оцінці можливості використання сучасного обладнання з теплогенерацією, зокрема теплового насоса, для забезпечення теплових потреб будинку.

На етапі 3 виконується аналіз енергетичних показників будинку із застосуванням розрахункових методів визначення тепловтрат, питомого енергоспоживання та ефективності функціонування інженерних систем. Оцінка базового рівня енергоспоживання дозволяє визначити доцільність впровадження енергоощадних заходів у процесі реконструкції будинку.

На етапі 4 виконується порівняльна оцінка розглянутих варіантів модернізації системи опалення за енергетичними та економічними показниками. Аналіз проводиться з урахуванням орієнтовного рівня енергоспоживання, експлуатаційних витрат та вартості обладнання, що дозволяє визначити найбільш доцільний варіант для будинку (рис. 2).

Пропоновані етапи удосконаленої методики передбачають застосування різних нормативів (ДБН та ін.), що стосуються кожної з відновлюваних інженерних мереж. Для оцінки ефективності методики визначаються параметри оптимізації y_i для кожного з етапів технічного обстеження обладнання. Зазначені параметри є функціями від сукупності факторів дослідження x_n , сформовані відповідно до чинних нормативних документів та методик технічного обстеження. Далі визначається узагальнена цільова функція u , яка враховує результати всіх етапів обстеження та відновлення:

$$y_i=f(x_1,x_2,\dots,x_n), \quad (1)$$

$$u=f(y_1,y_2,\dots,y_i). \quad (2)$$

Детальний приклад, як варіант застосування розробленої методики з використанням конкретних нормативів, проілюстровано для ситуації розглядуваної на рис. 1 будинку.

На етапі 1 дослідження виконано обстеження технічного стану пошкодженого будинку та наявного інженерного обладнання (рис. 1). Оцінювання проводилось з урахуванням конструктивних характеристик споруди, стану внутрішніх інженерних мереж, особливостей експлуатації та фактичного рівня енергоспоживання. У ході обстеження встановлено, що будинок був оснащений системами холодного та гарячого водопостачання, а забезпечення тепловою енергією здійснювалося від окремої котельні. Разом з тим, унаслідок пошкодження та втрати працездатності котельного обладнання система тепlopостачання не забезпечує належного функціонування об'єкта та потребує повної

модернізації із впровадженням сучасних енергоефективних рішень. Аналіз систем повітрообміну показав, що вентиляція в будинку організована за природним принципом та здійснюється переважно через відкриття вікон, дверей і кватирок. Такий спосіб повітрообміну не забезпечує стабільних параметрів мікроклімату, призводить до додаткових тепловтрат у холодний період року та негативно впливає на енергоефективність будинку в цілому.

На етапі 2 розроблено та проаналізовано варіанти модернізації системи теплопостачання будинку (рис. 3) із застосуванням енергоефективних технологій.



Рис. 3. Планувальні рішення поверхів будинку після реконструкції

З урахуванням результатів розрахунку теплового навантаження було виконано техніко-економічне порівняння чотирьох варіантів систем опалення: системи водяної теплої підлоги з електричним котлом, системи з

твердопаливним котлом та систему з тепловим насосом, а також системи електричної теплої підлоги у поєднанні із сонячною електростанцією. Результати розрахунків річного енергоспоживання та вартості обладнання графічно представлені на рис. 4. Виконана оцінка ефективності кожного варіанта з позиції енергоощадності, економічної доцільності та перспективності використання в умовах сучасних вимог до інженерного забезпечення будівель. Так використання електричного котла характеризується найвищими експлуатаційними витратами. Річне споживання електроенергії для цього варіанта становить близько 66,4 тис. кВт-год, а орієнтовні витрати на енергоресурси – майже 287 тис. грн на рік. Крім значного енергоспоживання, даний варіант потребує підвищених вимог до електричної мережі та резерву потужності системи електрозабезпечення будівлі. Система з твердопаливним котлом забезпечує найнижчі експлуатаційні витрати серед досліджених варіантів, що обумовлено відносно невисокою вартістю твердого палива.

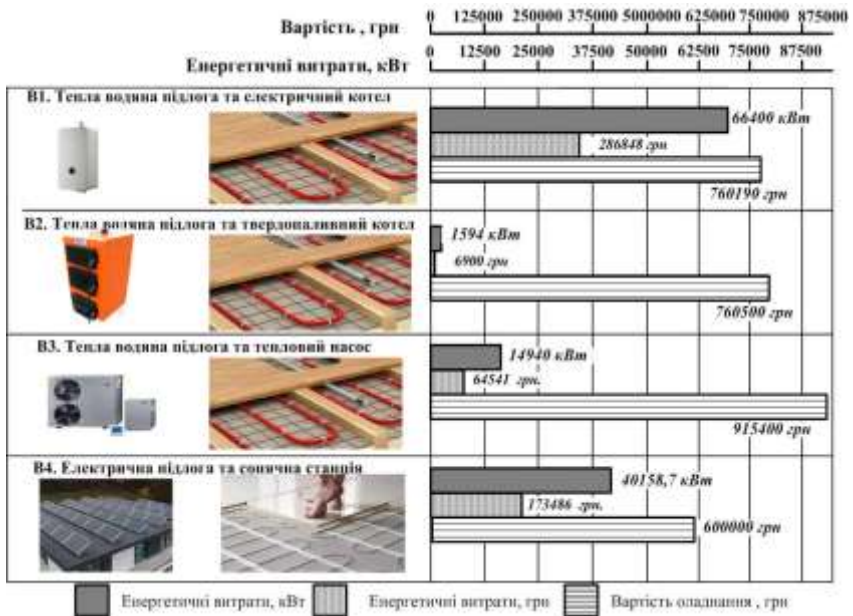


Рис. 4. Порівняння енергетичних та економічних показників систем опалення будинку

Однак її застосування супроводжується потребою у використанні значної кількості твердого палива, необхідністю постійного технічного обслуговування та меншою автоматизацією процесу тепlopостачання. Додатковим фактором є підвищений вплив на навколишнє середовище внаслідок продуктів згоряння палива. Вартість обладнання для цього варіанта є порівнянною з електричним котлом. Найбільш збалансованим рішенням за сукупністю техніко-економічних показників визначено систему з тепловим насосом. Попри вищі початкові витрати порівняно з традиційними системами, застосування теплового насоса дозволяє суттєво скоротити річне енергоспоживання, знизити експлуатаційні витрати до приблизно 64,5 тис. грн на рік. Додатковою перевагою є високий рівень автоматизації, екологічність та можливість інтеграції з відновлюваними джерелами енергії. Використання фотоелектричних панелей дозволяє частково компенсувати витрати електроенергії на опалення та зменшити навантаження на зовнішню електромережу. Річне енергоспоживання системи становить близько 40,2 тис. кВт-год, а орієнтовні експлуатаційні витрати – 173,5 тис. грн на рік. Попри достатньо високі капітальні витрати, перевагами такого рішення є використання відновлюваного джерела енергії, зниження викидів парникових газів, перспективність застосування в умовах підвищення тарифів на традиційні енергоносії. Але ефективність системи суттєво залежить від рівня інсоляції, потреби у резервному джерелі енергопостачання у періоди недостатньої генерації електроенергії.

На етапі 3 виконано аналіз енергетичних показників будинку після його реконструкції. Розрахунки проведено для двоповерхового будинку загальною площею близько 175 м². Оцінювання енергетичних характеристик здійснювалось з урахуванням об'ємно-планувальних параметрів будинку, кліматичних умов експлуатації та особливостей системи повітрообміну. У результаті проведеного аналізу встановлено, що найбільші втрати теплової енергії припадають на зовнішні огорожувальні конструкції та вентиляційний повітрообмін. Розрахункові тепловтрати будинку в опалювальний період становлять близько 12 кВт. При цьому додаткові втрати, пов'язані з інфільтрацією зовнішнього повітря та нестабільною роботою природної вентиляції, збільшують загальне теплове навантаження системи до 14 кВт. Оцінка річного енергоспоживання показала, що орієнтовна потреба будинку в тепловій енергії становить близько 18 тис. кВт-год на рік. На основі порівняння енергетичних витрат визначено доцільність підвищення ефективності інженерних систем шляхом модернізації опалення та вентиляції, що може сприяти зменшенню енергоспоживання будівлі, а також застосування автономного котельного обладнання тепловою потужністю 15 кВт, яке забезпечує покриття розрахункового теплового навантаження будівлі з урахуванням резерву

потужності для стабільної роботи системи в умовах пікових зимових навантажень. Отримані результати стали основою для подальшого аналізу варіантів реконструкції системи теплопостачання та вибору енергоефективного обладнання.

На етапі 4 проведено узагальнення, порівняльна оцінка розглянутих варіантів модернізації системи опалення будинку за енерго- й економічними показниками. Аналіз виконано для систем водяної теплої підлоги з використанням електродкотла, твердопаливного котла, теплового насоса, а також системи електричної теплої підлоги у поєднанні із сонячною електростанцією. Проведене дослідження дозволило оцінити рівень енергоефективності кожного варіанта та перспективність застосування з урахуванням енергоощадності та підвищення автономності інженерних систем. Результати порівняння показали, що варіант з електродкотлом характеризується найбільшим рівнем експлуатаційних витрат. Орієнтовне річне споживання електроенергії для цієї системи становить близько 66,4 тис. кВт-год, а витрати на енергоресурси можуть досягати 287 тис. грн на рік. Крім того, для такого рішення необхідне відповідне підсилення системи електрозабезпечення будівлі, забезпечення резерву електричної потужності. Використання твердопаливного котла дозволяє зменшити витрати на теплопостачання, однак експлуатація системи потребує регулярного обслуговування, організації зберігання палива та постійного контролю режимів роботи обладнання. Також цей варіант є з нижчим рівнем автоматизації порівняно з іншими системами та залежністю від стабільного постачання твердого палива. Система електричної теплої підлоги у поєднанні із сонячною електростанцією забезпечує часткове покриття потреб будівлі в електроенергії шляхом використання відновлюваних джерел енергії. Застосування фотоелектропанелей дозволяє знизити навантаження на зовнішню електромережу та скоротити витрати на енергоспоживання у порівнянні з традиційними електросистемами опалення. Але ефективність системи знижується в холодний період року.

За результатами проведеного аналізу найбільш доцільним варіантом для досліджуваного будинку визначено систему з тепловим насосом. Використання такого обладнання забезпечує зниження річних витрат на енергоресурси до приблизно 64,5 тис. грн та дозволяє підвищити енергоефективність системи теплопостачання. Додатковими перевагами є автоматизований режим роботи, зменшення залежності від традиційних видів палива та можливість інтеграції з іншими енергоощадними технологіями. Зростання кількості частково пошкоджених і зруйнованих будинків у прифронтових громадах, потреба реконструкції житлового фонду та відновлення інженерних систем для забезпечення житлом

внутрішньо переміщених осіб обумовлюють актуальність застосування енергоефективних технологій та відновлюваних джерел енергії в системах теплопостачання. Особливості географічного розташування та кліматичних умов південних прифронтових регіонів України, зокрема Запорізької області, результати порівняльного аналізу різних систем опалення підтверджують ефективність використання теплових насосів типу «вода–вода» та сонячних електростанцій як додаткових джерел енергозабезпечення в періоди достатньої інсоляції.

Висновки

1. Розроблено удосконалену методику технічного обстеження інженерних систем індивідуальних будинків, пошкоджених внаслідок воєнних дій, використання якої сприяє скороченню термінів виконання відновлювальних робіт, підвищенню ефективності технічної допомоги та створенню належних умов для тимчасового або постійного проживання внутрішньо переміщених осіб у відновлених будинках. Дана методика може бути поширена на використання для інших типів житлових будинків (наприклад – більшої поверховості), а у перспективі – також бути адаптована для громадських будівель (шкіл, лікарень, готелів тощо).

2. Апробація вдосконаленої методики технічного обстеження на прикладі пошкодженого будинку дозволила комплексно оцінити стан інженерних систем та визначити основні напрями їх подальшого відновлення і модернізації. Отримані результати підтвердили доцільність застосування комплексного підходу до технічного обстеження інженерних систем, що дозволяє прискорити процес оцінки технічного стану пошкоджених будинків, забезпечити оперативне прийняття рішень щодо їх відновлення та впровадження енергоефективного обладнання.

3. Проведений аналіз енергетичних показників показав, що розрахункове теплове навантаження будинку становить близько 14 кВт, орієнтовне річне споживання теплової енергії – 18 тис. кВт-год. Отримані результати підтвердили доцільність модернізації системи теплопостачання та впровадження енергоощадних рішень.

4. Порівняльний аналіз трьох варіантів систем опалення (водяної теплої підлоги з електрокотлом, твердопаливним котлом, теплонасосом) показав, що система з електрокотлом має найвищі експлуатаційні витрати, а застосування твердопаливного котла потребує постійного технічного обслуговування, організації паливного господарства.

5. За сукупністю енергетичних, економічних та експлуатаційних показників найбільш доцільним для досліджуваного будинку визначено варіант із застосуванням теплового насоса. Використання таких систем дозволяє підвищити рівень енергетичної автономності будівель, зменшити

залежність від традиційних енергоносіїв, вартість яких зростає, а також забезпечити більш стабільне функціонування інженерної інфраструктури в умовах можливих перебоїв централізованого енергопостачання. Додатковою перевагою є поступове зниження вартості обладнання для сонячних електростанцій і теплових насосів, що сприяє розширенню можливостей їх практичного впровадження під час відновлення та модернізації забудови, зокрема для забезпечення доступного та енергоефективного житла для соціально вразливих категорій населення.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. DBN V.2.6-31:2021. (2021). *Теплова ізоляція та енергоефективність будівел*. Kyiv: Minrehion Ukrainy.
2. DSTU 9190:2022. (2022). *Енергетична ефективність будівел. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та hariachoho vodopostachannia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy
3. DBN V.2.5-67:2013. (2013). *Опалення, вентиляція та кондиціонування*. Kyiv: Minrehion Ukrainy.
4. Xie, D., & Xie, Q. (2024). Internet of things-based study on online monitoring system of building equipment energy saving optimization control using building information modeling. *Building Services Engineering Research and Technology*, 107(2),1–23. <https://doi.org/10.1177/00368504241228130>
5. Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, 556-565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>
6. Zhang, K., Blum, D., Cheng, H., Paliaga, G., Wetter, M., & Granderson, J. (2022). Estimating ASHRAE Guideline 36 energy savings for multi-zone variable air volume systems using Spawn of EnergyPlus. *Journal of Building Performance Simulation*, 15(2), 215-236. <https://doi.org/10.1080/19401493.2021.2021286>

7. Khalilnejad A. et al. (2020). Data-driven evaluation of HVAC operation and savings in commercial buildings. *Applied Energy*, 278, 115505. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115505>
8. Hepbasli, A., & Kalinci, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1211–1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>
9. Selikhov Yu. A., Horbunov K. O., Stasov V. A. (2021). Intehratsiia roboty ponovliuvanykh dzherel enerhii dlia hariachoho vodopostachannia ta opaliuvannia budivel. *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia*, 4, 3–10. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2021.4.01>
10. Zaitsev V. I. (2024). Analiz orhanizatsiino-tekhnolohichnykh rishen dlia kompleksnoi termomodernizatsii tipovykh bahatopoverkhovykh zhytlovykh budivel. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*, 12, 89–101. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.241225.89.1212>
11. Syvolap, Yu., Tytok, V. (2023). Metody otsinky zhyttievoho tsylku budivnytstva ta yikh kliuchovi osoblyvosti. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva*, 52(1), 101–109. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52\(1\).101-109](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(1).101-109)
12. Basko, A. V., Ponomarova, O. A. (2022). Metodolohiia proektuvannia avtomatychnoi systemy strukturnoho monitorynhu tekhnichnoho stanu budivel ta sporud. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, 4, 64–71. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-163-4-64-71>
13. Stepaniuk, R. (2022). Systemnyi pidkhid do rekonstruktsii inzhenernykh sporud iz vykorystanniam intelektualnykh informatsiinykh system ta normatyvno-tekhnichnykh rehlamentiv. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva*, 2(49), 159–170. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).159-170](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).159-170)
14. DSTU 9273:2024. (2024). Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.

Література

1. ДБН В.2.6-31:2021. (2021). Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ: Мінрегіон України.
2. ДСТУ 9190:2022. (2022). Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. Київ: Мінрегіонбуд України.
3. ДБН В.2.5-67:2013. (2013). *Опалення, вентиляція та кондиціонування*. Київ: Мінрегіон України.
4. Xie, D., & Xie, Q. (2024). Internet of things-based study on online monitoring system of building equipment energy saving optimization control using building information modeling. *Building Services Engineering Research and Technology*, 107(2), 1–23. <https://doi.org/10.1177/00368504241228130>
5. Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. (2017). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>
6. Zhang, K., Blum, D., Cheng, H., Paliaga, G., Wetter, M., & Granderson, J. (2022). Estimating ASHRAE Guideline 36 energy savings for multi-zone variable air

volume systems using Spawn of EnergyPlus. *Journal of Building Performance Simulation*, 15(2), 215-236. <https://doi.org/10.1080/19401493.2021.2021286>

7. Khalilnejad, A. et al. (2020). Data-driven evaluation of HVAC operation and savings in commercial buildings. *Applied Energy*, 278, 115505. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115505>

8. Hepbasli, A., & Kalinci, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1211-1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>

9. Селіхов, Ю. А., Горбунов, К. О., Стасов, В. А. (2021). Інтеграція роботи поновлюваних джерел енергії для гарячого водопостачання та опалювання будівель. *Інтегровані технології та енергозбереження*, 4, 3-10. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2021.4.01>

10. Зайцев, В. І. (2024). Аналіз організаційно-технологічних рішень для комплексної термомодернізації типових багатоповерхових житлових будівель. *Український журнал будівництва та архітектури*, 12, 89-101. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.241225.89.1212>

11. Сиволап, Ю., Титок, В. (2023). Методи оцінки життєвого циклу будівництва та їх ключові особливості. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 52(1), 101-109. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52\(1\).101-109](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(1).101-109)

12. Басько, А. В., Пономарьова, О. А. (2022). Методологія проектування автоматичної системи структурного моніторингу технічного стану будівель та споруд. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 4, 64-71. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-163-4-64-71>

13. Степанюк Р. (2022). Системний підхід до реконструкції інженерних споруд із використанням інтелектуальних інформаційних систем та нормативно-технічних регламентів. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2(49), 159-170. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).159-170](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).159-170)

14. ДСТУ 9273:2024. (2024). Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ: Мінрегіонбуд України.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.05.2026	Received 12.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 19.05.2026	Received in revised form 19.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. H. Dobrovol'ska

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1337-7216>
Department of Urban Construction and Architecture
Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi Avenue, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006

O. M. Fostashchenko*

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4287-2838>
Department of Urban Construction and Architecture
Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi Avenue, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006

*corresponding author, e-mail: zdia207@gmail.com

Improved methodology for the reconstruction of engineering equipment in individual residential buildings damaged as a result of military actions

How to Cite:

Dobrovolska, O. H., Fostashchenko, O. M. (2026). Improved methodology for the reconstruction of engineering equipment in individual residential buildings damaged as a result of military actions. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 238-253. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-18)

Abstract. The article examines the issue of improving the methodology for the reconstruction of engineering equipment in damaged buildings through the implementation of energy-saving technologies. The relevance of the study is determined by the need to modernize Ukraine's building stock in the context of post-war recovery, reduce energy consumption, and decrease operating costs. Particular attention is paid to the modernization of heat supply systems and the assessment of the feasibility of using modern heat-generating equipment. The object of the study is the methodology for the reconstruction of the engineering equipment of an individual two-story residential building. The subject of the research is the methods of improving the energy efficiency of the heating system through equipment modernization and the application of energy-saving technologies. The study applies a comprehensive approach that includes analysis of the technical condition of the building, assessment of energy performance indicators, and comparative analysis of heat supply options. The study found that the building's heat supply system had lost its operational capacity due to damage to the boiler equipment, while natural ventilation caused significant heat losses and increased energy consumption. The calculated heating load of the building is approximately 14 kW, and the estimated annual thermal energy consumption is about 18 thousand kWh. The paper considers four heating system options: underfloor water heating with an electric boiler, a solid-fuel boiler, a heat pump, a solar power station, and electric floor heating. Comparative analysis showed that the system with an electric boiler has the highest operating costs, while the use of a solid-fuel boiler requires constant technical maintenance. The most appropriate option was determined to be the heat pump system, which ensures reduced energy resource costs and improved energy efficiency of the heat supply system.

Keywords: building reconstruction, engineering equipment, heating system, heat pump, energy saving.

УДК 624.154.7

О. Т. Гнатюк*

к.т.н., доцент, ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-2218-0295>

Кафедра будівельних конструкцій

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівський район, Львівська область, Україна, 80381

Ю. М. Фабрика

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1745-1356>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

*автор-кореспондент, e-mail: OTHnatiuk@ukr.net

Технічне обстеження несучих конструкцій полігонального сталевого флаштока на площі Б. Хмельницького у місті Ужгороді

Цитувати як:

Гнатюк, О.Т., Фабрика, Ю.М. (2026). Технічне обстеження несучих конструкцій полігонального сталевого флаштока на площі Б. Хмельницького у місті Ужгороді. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 254-264. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-19](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-19)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. Обстеження сталевих конструкцій полігонального сталевого флаштока при проведенні реконструкції існуючого фундаменту під влаштування флаштока на площі Б. Хмельницького в місті Ужгороді проводилося з метою оцінки його технічного стану та експлуатаційної придатності.

Флашток представляє собою сталеву конічну полігональну конструкцію, три секції якої з'єднані методом самонасаджування і мають покриття методом гарячого цинкування. На стовбурі опори є конструктивні елементи (ролики) необхідні для підйому та опускання прапора за допомогою електричного приводу. Згідно проектної документації флашток в змонтованому вигляді має загальну висоту 30 м, діаметр біля опорної частини – 850 мм, у верхній частині – 200 мм. Товщина металу нижньої секції – 5 мм, двох верхніх – 4 мм. Місце обпірання на фундамент посилене сталевую пластинною діаметром 1180 мм товщиною 30 мм з вертикальними ребрами жорсткості та 20-ма отворами для анкерів кріплення. На день огляду нижня частина опорної плити з анкерами кріплення закладної деталі схована покриттям з кам'яної бруківки.

Під час проведення обстеження проводилися наступні роботи: аналіз технічної документації на спорудження флаштока; суцільне візуальне обстеження технічного стану сталевих елементів з фотофіксацією; геодезичні

вимірювання кренів споруди цогли, нівелювання положення опорної частини цогли та топографічне знімання; аналіз матеріалів авторського нагляду виконавця робіт з розробки проекту.

У результаті проведення робіт з обстеження не виявлені зовнішні ознаки корозійного ураження та механічні пошкодження конструкції. Встановлене відхилення конструкції цогли від проектного положення та невідповідність конструкції закладної анкерної деталі проекту.

На основі проведеного обстеження рекомендується здійснити заходи з посилення опорної частини нижньої секції флагиштока та провести вивірку її положення та закріпити гайками з контргайками із заповненням зазорів надміцним розчином

Ключові слова: сталеві конструкції, флагишок, крен споруди, геодезичні вимірювання, нівелювання положення, топографічне знімання, корозійне ураження.

Вступ

Будівельно-технічне обстеження конструкції полігонального сталевого флагиштока (цогли для прапора), спорудженого в місті Ужгороді на площі Б. Хмельницького до 30-ї річниці Незалежності України проводилося з метою оцінки його технічного стану та експлуатаційної придатності.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Технічний стан окремих конструкцій і об'єкта загалом щодо можливості їх безпечної та надійної експлуатації за призначенням визначають на основі відповідності нормативним вимогам з експлуатаційної придатності (механічної міцності, стійкості та інших вимог, установлених технічним завданням на обстеження) [1-6].

Під час проведення технічного обстеження об'єкта встановлюють реальні фізико-механічні параметри для несучих і огорожувальних конструкцій, визначають зусилля в елементах, а також виявляють дефекти та пошкодження, що негативно впливають на їх експлуатаційні властивості. Оцінювання ступеня придатності конструкцій здійснюють шляхом порівняння фактичних показників із вимогами проектної та нормативної документації згідно з [2], результатом чого є визначення категорії технічного стану.

Мета і завдання дослідження. Метою проведеної роботи є оцінка поточного стану та експлуатаційної придатності металевих конструкцій споруди флагиштока. Завданням досліджень є надання висновків щодо можливості його подальшої безпечної експлуатації з врахуванням існуючого стану несучих конструкцій.

Матеріали та методи

Об'єкт обстеження розташований у межах озелененої території на перехресті вулиці Льва Толстого, проспекту Свободи та площі Богдана Хмельницького (рис. 1). Досліджувана споруда являє собою металевий флагшток висотою 30 м, виконаний у вигляді сталевий конічної полігональної щогли, що складається з трьох секцій. З'єднання секцій здійснено методом самонасаджування, що забезпечує необхідну просторову жорсткість та надійність конструкції. Захист металевих елементів від атмосферного впливу та корозійного ураження виконано методом гарячого цинкування.



Рис. 1 Ділянка розташування досліджуваного об'єкту

У геоморфологічному відношенні ділянка розташована в межах лівобережної надзаплавної тераси річки Уж. Поверхня території рівнина, зі штучно спланованим рельєфом. Абсолютні висотні позначки в межах ділянки знаходяться в інтервалі 116,99÷117,34 м. Під час обстеження ознак розвитку сучасних небезпечних фізико-геологічних процесів, зокрема просідань, підтоплення, зсувних явищ чи нерівномірних деформацій ґрунтової основи, не зафіксовано. Інженерно-геологічні умови території можна оцінити як сприятливі для експлуатації споруди. Відповідно до карти мікросейсморайонування м. Ужгорода, розробленої Українським державним головним інститутом інженерно-технічних вишукувань та затвердженої Держбудом УРСР у 1990 році, сейсмічність ділянки становить 7 балів.

На стовбурі флагштока змонтовані спеціальні конструктивні елементи - роликові механізми, призначені для забезпечення піднімання і опускання прапора за допомогою електричного приводу. Згідно з наданою технічною документацією висота щогли становить 30 м, діаметр в нижній частині становить 850 мм, а у верхній - 200 мм. Товщина стінки металу нижньої секції складає 5 мм, двох верхніх секцій - по 4 мм. Конструкція вузла опирання на фундамент посилена круглою сталевий опорною

пластиною діаметром 1180 мм та товщиною 30 мм, обладнаною вертикальними ребрами жорсткості. Для анкерного закріплення передбачено 20 монтажних отворів. На момент проведення обстеження нижня частина опорної плити разом із анкерними елементами закладної деталі була прихована під покриттям із кам'яної бруківки, що унеможливило повний візуальний контроль стану анкерного вузла.

У процесі технічного обстеження виконано комплекс робіт, спрямованих на оцінку фактичного технічного стану споруди та умов її експлуатації, а саме:

- аналіз проектної та технічної документації щодо спорудження сталевого флагштока висотою 30 м;

- детальне візуальне обстеження сталевих елементів конструкції з оцінкою наявності корозійних пошкоджень, деформацій, дефектів захисного покриття та механічних ушкоджень із фотофіксацією виявлених особливостей;

- проведення геодезичних вимірювань вертикальності споруди, визначення величини кренів щогли, нівелювання опорної частини та виконання топографічного знімання прилеглої території;

- опрацювання матеріалів авторського нагляду та виконавчої документації організації-розробника проекту;

- оцінка відповідності фактичного конструктивного виконання споруди проектним рішенням і нормативним вимогам.

Для проведення обстеження замовником було надано комплект вихідної документації, зокрема:

- технічне завдання на виконання проектно-вишукувальних робіт;

- топографічну зйомку ділянки розташування флагштока на площі Богдана Хмельницького в місті Ужгороді;

- паспорт закладної деталі кріплення полігонального сталевого флагштока до фундаментної основи;

- метеорологічний бюлетень Закарпатського обласного центру з гідрометеорології ДСНС України;

- матеріали виконавчої та проектної документації, необхідні для аналізу конструктивних і експлуатаційних характеристик споруди.

За результатами попереднього візуального огляду встановлено, що загальний технічний стан надземної частини флагштока є задовільним. Ознак критичних деформацій, значних корозійних уражень чи порушення цілісності основних несучих елементів не виявлено. Разом з тим, для остаточної оцінки технічного стану вузла кріплення та фундаментної частини доцільним є проведення додаткового інструментального обстеження прихованих елементів анкерного кріплення після часткового демонтажу покриття з бруківки.

Під час виконання геодезичних та інструментальних вимірювань використовувався комплекс спеціалізованого обладнання та вимірювальних приладів, а саме: цифровий фотоапарат Olympus SP-510UZ; електронний тахеометр Leica TCR 1203 R300.

Для проведення допоміжних вимірювань застосовувалась стрічкова рулетка Stabila довжиною 8 м. Температурні показники поверхонь визначалися за допомогою інфрачервоного пірметра Flus IR-829. Контроль геометричних параметрів окремих елементів конструкції виконувався електронним штангенциркулем Mitutoyo 500-171-20. (абзаци скорочено)

Топографічне знімання території виконувалося методом тахеометричної зйомки у масштабі 1:500 з висотним перерізом рельєфу горизонталлями через 0,5 м. У процесі проведення польових робіт одночасно здійснювалося кодування елементів місцевості за допомогою функціональних можливостей електронного тахеометра. Отримані вимірювальні та семантичні дані зберігалися у внутрішній пам'яті приладу та в подальшому були використані при камеральній обробці результатів і створенні топографічного плану ділянки.

На основі складеного топографічного плану та результатів фіксації фактичного положення елементів щогли було розроблено спрощену схему просторового положення частин флагштока, а також визначено ймовірне положення закладної деталі вузла обпирання конструкції на фундамент (рис. 2,3).



Рис.2. Фотофіксація процесу геодезичного вимірювання кренів споруди щогли

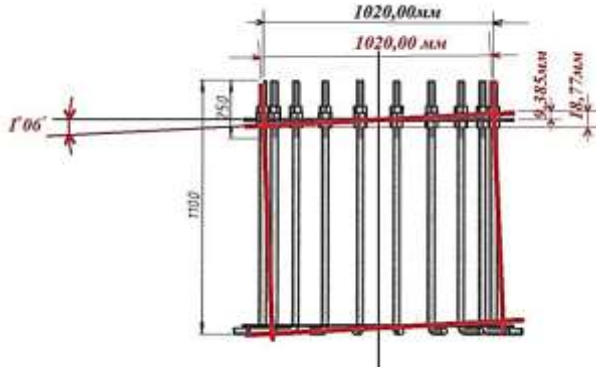


Рис. 3. Ймовірне положення закладної деталі обпирання конструкції щогли

Слід зазначити, що встановлене під час геодезичних вимірювань відхилення щогли від вертикальної осі за своїми величинами не може бути пояснене лише можливими похибками у відмітках встановлення або регулювання гайок анкерного кріплення опорної частини конструкції флагштока. Це може свідчити про наявність інших факторів, що вплинули на просторове положення споруди, зокрема нерівномірних деформацій вузла обпирання, похибок монтажу або зміщення конструкції в процесі експлуатації.

Результати та обговорення

У результаті проведеного технічного обстеження встановлено наступне:

- за результатами візуального огляду сталевих елементів конструкції ознак корозійного ураження, механічних пошкоджень, локальних деформацій, руйнувань чи втрати несучої здатності матеріалу щогли не виявлено, технічний стан металевих елементів флагштока в цілому можна оцінити як задовільний, а виявлені характеристики не свідчать про втрату міцності або стійкості конструкції;

- відповідно до матеріалів фотофіксації, виконаної в процесі авторського нагляду, для анкерних елементів використано сталевий прокат із фактичним зовнішнім діаметром 29,86 мм, що відповідає вимогам нормативних документів щодо допустимих відхилень геометричних розмірів;

- водночас зафіксований зовнішній діаметр різьби анкерних елементів становить 27,71 мм, що не відповідає вимогам норм у частині відповідності зовнішнього діаметра різьби діаметру циліндра, на який

здійснюється нарізування - геометричні параметри різьбового з'єднання мають відхилення від нормативних вимог;

- у зв'язку з цим встановлено, що застосована конструкція закладної анкерної деталі відрізняється від типової конструкції, передбаченої виробником флагштока для анкерних болтів із зовнішнім діаметром 30 мм;

- на підставі аналізу топографічного плану, складеного за результатами геодезичної фіксації положення секцій щогли та ймовірного розташування закладної деталі фундаментного вузла, встановлено відхилення осі стовбура щогли від вертикалі. У верхній точці конструкції на відмітці 147,58 м величина зміщення становить 610 мм, або 0,021 відносно нижньої точки на відмітці 117,92 м, у напрямку 29°37' на північ. Вказане значення перевищує гранично допустиме відхилення для змонтованих металевих конструкцій щогл, передбачене п. 16.5.1 нормативного документа [7], яке становить 0,007, тобто перевищення складає приблизно в три рази.

Висновки

Беручи до уваги результати проведеного технічного обстеження, для забезпечення подальшої надійної та безпечної експлуатації споруди рекомендується виконати комплекс заходів із підсилення анкерної групи та опорного вузла нижньої секції флагштока (щогли для прапора), а також усунення виявленого відхилення конструкції від вертикального положення.

З метою зменшення наявного перекосу та приведення положення щогли у відповідність до нормативних вимог доцільно виконати регулювання положення опорної плити шляхом максимально можливого коригування відміток опорних гайок різьбової частини існуючих анкерних болтів. Роботи необхідно проводити з постійним геодезичним контролем просторового положення конструкції.

Як один із можливих варіантів підсилення пропонується передбачити встановлення додаткових анкерних елементів у вигляді сталевих шпильок діаметром 30 мм, закріплених у тіло оголовка фундаменту із застосуванням хімічних анкерів. Кількість, довжина анкерів, глибина їх анкерування та схема розташування повинні бути визначені на підставі розрахунків спеціалізованої проектної організації з урахуванням діючих навантажень, у тому числі вітрових та динамічних впливів. Для об'єднання існуючої та додаткової анкерної системи рекомендується передбачити монтаж додаткового сталевого фланця, жорстко з'єданого з існуючим фланцем анкерної групи шляхом зварювання відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Одночасно рекомендується виконати підсилення опорного фланця нижньої секції флагштока шляхом встановлення додаткового зовнішнього фланця з влаштуванням вертикальних і радіальних ребер жорсткості. Таке конструктивне рішення дозволить підвищити жорсткість вузла опирання, забезпечити більш рівномірний розподіл навантажень між анкерними елементами та знизити ризик виникнення локальних деформацій у зоні фундаментного кріплення.

Після виконання робіт із підсилення необхідно провести вивірку просторового положення флагштока на опорних гайках, розташованих по двох взаємно перпендикулярних осях. Контроль правильності встановлення конструкції слід здійснювати геодезичними методами з перевіркою відповідності фактичного положення щогли вимогам нормативного документа [6]. Після досягнення проєктного положення конструкцію необхідно остаточно закріпити за допомогою гайок та контргайок із забезпеченням надійної фіксації вузла.

Порожнини та зазори між посиленним фланцем анкерної групи та поверхнею фундаменту рекомендується заповнити високоміцним безусадковим розчином, тип і марка якого мають бути визначені проєктною документацією. Використання такого розчину забезпечить рівномірну передачу зусиль від конструкції на фундамент, зменшить концентрацію напружень у зоні опирання та підвищить довговічність вузла кріплення.

Після завершення всіх монтажних-підсилювальних робіт доцільно виконати повторне комплексне технічне обстеження та геодезичний моніторинг положення щогли з оформленням відповідної виконавчої документації та висновків щодо можливості її подальшої експлуатації.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. DSTU-N B V.1.2-18:2016. Guidelines for the inspection of buildings and structures to determine and assess their technical condition. Effective from 2017-04-01. Official edition. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNTs", 2017. 44 p.
2. DBN V.1.2-14:2018. System for ensuring the reliability and safety of construction sites. General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures. With Amendment No. 1. Effective from 2022-09-01. Official edition. Kyiv: Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine (Minregion of Ukraine), State Enterprise "Ukrarchbudinform", 2022. 36 p.
3. Hnatyuk O., Osadchuk T., Volynets M. Results of technical inspection of supporting steel structures of a light lantern on the roof of the building of the Lviv National University named after I. Franko. Visnyk of the Lviv National University of Environmental Sciences. Series Architecture and Construction, (25), pp. 66–72 <https://doi.org/10.31734/architecture2024.25.066>
4. Ninichuk, M.V., Rotko, S.V., Talakh L.O., Kyslyuk D.Ya., Krantovska O.M. (2025). Determination of bearing capacity and development of measures to strengthen the structures of reinforced concrete beams of a cardboard machine using nonlinear calculation methods. Modern technologies and calculation methods in construction, 24, 244-254. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-20)
6. Rutkovska I., Fabrika Yu. (2025). Technical inspection and reinforcement of the wind power plant structure. Bulletin of the Lviv National Ecological University. Series "Architecture and Construction", (26), 62–65. <https://doi.org/10.31734/architecture2025.26.062>
7. DSTU B V.2.6-200:2014. Metal building structures. Installation requirements. Kyiv: Minregionalbud of Ukraine, 2014. 44 p.

Література

- 1.ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Чинний від 2017-04-01. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 44 с.
2. ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Чинний з 2019-01-01.Київ: Мінрегіон України, 2018. 30 с.
3. Гнатюк О., Осадчук Т., Волинець М. Результати технічного обстеження несучих сталевих конструкцій світлового ліхтаря на даху будівлі ЛНУ ім. І. Франка. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Архітектура та будівництво*, (25), С. 66–72 <https://doi.org/10.31734/architecture2024.25.066>
4. Нінічук, М.В., Ротко, С.В., Талах Л.О., Кислюк Д.Я., Крантовська О.М. (2025). Визначення несучої здатності та розробка заходів з підсилення конструкцій

залізобетонних балок картоноробної машини із застосуванням методів нелінійного розрахунку. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 244-254. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-20)

5. Бурчєня С., Дудяк Н., та Віхот С. (2025). Результати технічного обстеження 120-метрової метеорологічної трикутної щогли. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія «Архітектура та будівництво»*, (26), 34–42. <https://doi.org/10.31734/architecture2025.26.034>

6. Рутковська І., Фабрика Ю. (2025). Технічне обстеження та підсилення конструкції вітроелектростанції. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія «Архітектура та будівництво»*, (26), 62–65. <https://doi.org/10.31734/architecture2025.26.062>

7. ДСТУ Б В.2.6-200:2014. Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 44 с.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.05.2026	Received Отримано 14.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 17.05.2026	Received in revised form 17.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

О. Т. Hnatiuk*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-2218-0295>
Department of building structures

Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv, V. Velykiho St., 1, Dublyany, Lviv district, Lviv region, Ukraine, 80381

Yu. M. Fabryka

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1745-1356>
Department of construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

*corresponding author, e-mail: OTHnatiuk@ukr.net

Technical inspection of the supporting structures of the polygonal steel flagpole on B. Khmelnytskyi Square in the city of Uzhhorod

How to Cite:

O. T. Hnatiuk, Yu. M. Fabryka (2026). Technical inspection of the supporting structures of a polygonal steel flagpole on B. Khmelnytskyi Square in the city of Uzhhorod. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 254-264. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-19](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-19)

Abstract. Inspection of steel structures of a polygonal steel flagpole during the reconstruction of the existing foundation for the flagpole installation on B. Khmelnytskyi Square in the city of Uzhgorod was carried out to assess its technical condition and operational suitability.

The flagpole is a steel conical polygonal structure, the three sections of which are connected by the self-installation method and are coated by the hot-dip galvanizing method. On the support shaft there are structural elements (rollers) necessary for raising and lowering the flag using an electric drive. According to the design documentation, the flagpole in assembled form has a total height of 30 m, diameter near the support part - 850 mm, in the upper part - 200 mm. The thickness of the metal of the lower section is 5 mm, the two upper ones - 4 mm. The support point on the foundation is reinforced with a steel plate with a diameter of 1180 mm and a thickness of 30 mm with vertical stiffening ribs and 20 holes for anchors. On the day of the inspection, the lower part of the base plate with anchors for the embedded part is hidden by a stone paving slab.

During the inspection, the following work was carried out: analysis of technical documentation for the construction of the flagpole; continuous visual inspection of the technical condition of steel elements with photo fixation; geodetic measurements of the flagpole structure's inclination, leveling of the position of the flagpole supporting part and topographic survey; analysis of the materials of the author's supervision of the project development contractor.

As a result of the survey work, no external signs of corrosion damage or mechanical damage to the structure were detected. A deviation of the mast design from the design position and a non-compliance of the embedded anchor detail design with the project were established. (абзац скорочено)

Based on the survey, it is recommended to take measures to strengthen the supporting part of the lower section of the flagpole and to adjust its position and secure it with nuts and locknuts, filling the gaps with high-strength mortar.

Keywords: steel structures, flagpole, structure inclination, geodetic measurements, position leveling, topographic surveying, corrosion damage.

УДК 624.04:624.078.3:620.179

І. С. Чернов

к. т. н., старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-1006>

Кафедра процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів

Одеська державна академія будівництва та архітектури,

вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

Е. А. Дармофал*

к. т. н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1160-8850>

Кафедра екології та техногенної безпеки

Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут" вул. Вадима

Манька, 17, м. Харків, Україна, 61070.

І. О. Кадикало

к. т. н., старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5686-5869>

Кафедра конструювання машин і обладнання

Національний університет біоресурсів і природокористування України вул. Героїв Оборони, 15 м. Київ, Україна, 03041.

*автор-кореспондент, e-mail: elyadarmofal@gmail.com

Методи оцінки технічного стану будівель після екстремальних впливів

Цитувати як: Чернов, І. С., Дармофал, Е. А., Кадикало, І. О. (2026). Методи оцінки технічного стану будівель після екстремальних впливів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 265-283. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-20)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розглянуті методичні підходи до оцінки технічного стану будівель після вибухових та термічних впливів. Запропонована система поєднує польові обстеження, геодезичні вимірювання та лабораторні дослідження матеріалів. Особливу увагу приділено інтеграції даних у єдину розрахункову модель. Дослідження починається з фіксації типів пошкоджень та визначення їхніх геометричних характеристик. На основі отриманих відомостей формується інтегральний індекс структурної пошкоженості. Просторовий моніторинг деформацій здійснюється за допомогою лазерного сканування та тахеометричних зйомок. Матеріали досліджуються комбінованими методами. Враховуються втрати міцності бетону й арматури під впливом високих температур та корозії. Розроблені математичні співвідношення дають змогу розрахувати залишковий розрахунковий опір та коефіцієнт несучої здатності. Параметризована цифрова модель відтворює реальні умови експлуатації. Вона враховує зниження жорсткості, локальні руйнування та ймовірність прогресуючого обвалення. Нелінійний аналіз напруженого стану визначає граничні значення для прийняття рішень. Показники вказують на необхідність підсилення або повної реконструкції. Окремий розділ присвячено прогнозуванню зміни стану конструкцій у часі. Запропонований алгоритм ранжує варіанти відновлення за технічними та

економічними критеріями. Практичне впровадження методики підтвердило її ефективність. Отримані кількісні показники забезпечують обґрунтований вибір між ремонтом та демонтажем. Робота формує наукову основу для безпечної експлуатації пошкоджених об'єктів. Результати можуть бути використані під час розробки нормативних документів та інженерних проєктів відновлення. Дослідження створює підґрунтя для подальшого розвитку теорії оцінки стійкості споруд у складних експлуатаційних умовах. Наукова новизна полягає в систематизації інструментальних даних та їхній адаптації до сучасних розрахункових стандартів. Апробація підходу на реальних об'єктах показала високу збіжність між розрахунковими значеннями та фактичним станом конструкцій.

Ключові слова: технічне обстеження будівель, вибухові пошкодження, залишкова несуча здатність, скінченно-елементне моделювання, прогресуюче обвалення, відновлення конструкцій, попередження ризиків техногенного характеру.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Результати діагностики будівельних конструкцій, що зазнали вибухових навантажень, представлено в науковій публікації Шатова С. В., Богаченка С. В. та Рудіна А. А. [1]. Автори встановили залежність між локальними руйнуваннями перерізів і втратою несучої здатності окремих елементів. Наділі Сергійчук В. А. та співавтори [2] у своєму дослідженні запропонували практичні результати оцінювання житлового будинку, пошкодженого внаслідок військових дій. Вони довели, що поєднання візуального аналізу, розкриття конструкцій та інженерних розрахунків дає змогу достовірно класифікувати технічний стан. Однак питання формалізації інтегральних критеріїв оцінювання залишаються відкритими. У роботі Сергійчука В. А., Яковенка М. М., Нестеренка О. В., Зоріна Є. О. та Бєня І. О. [3] висвітлено результати геодезичного забезпечення обстеження пошкоджених будівель. Автори аналізують застосування лазерного сканування та просторового моніторингу деформацій.

Дослідження Берчуна Я. О., Теличка Р. І. та Клименкова О. А. [4] містить результати застосування алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованого розпізнавання пошкоджень. Водночас механізми прогнозування залишкового ресурсу розкрито недостатньо. У публікаціях Кушніра О. та ін. [5], Нужного В. та Колякової В. [6], а також Шеховцова В. та ін. [7] продемонстровано ефективність чисельного моделювання напружено-деформованого стану пошкоджених конструкцій. Масові пошкодження будівель унаслідок вибухів, пожеж та ракетних обстрілів вимагають швидкого й технічно обґрунтованого визначення їхньої залишкової несучої здатності. Наявні підходи часто розглядають окремо польове обстеження, розрахункове моделювання та прогнозування

деградації конструкцій. Це ускладнює прийняття інженерних рішень. Тому актуальним завданням є розроблення інтегрованих методичних підходів визначення стану будівлі за наслідком екстремального тиску.

Мета і завдання дослідження. Мета статті – обґрунтувати методичні підходи оцінювання технічного стану будівель, які зазнали екстремального впливу і мають значні пошкодження.

Завдання дослідження:

– розробити послідовний алгоритм кількісного оцінювання екстремальних пошкоджень;

– сформулювати розрахунково-аналітичний підхід до прогнозування залишкової несучої здатності будівлі.

Матеріали та методи

Емпіричною базою дослідження виступили чинні нормативні акти та матеріали технічних обстежень. Окрему групу утворили відомості неруйнівного контролю. Об'єктами наукового аналізу стали споруди з ознаками вибухового, ударного та термічного пошкодження. Інструментальна діагностика базувалася на візуальному огляді та фотограмметричній фіксації дефектів. Просторове положення несучих елементів контролювали методами тахеометрії та цифрового нівелювання. Внутрішню структуру матеріалів досліджували ультразвуковим прозвучуванням. Механічні властивості визначали шляхом статичного випробування відібраних кернів. Корозійний стан арматури оцінювали за вимірними втратами поперечного перерізу.

Результати та обговорення

Після вибухового ураження або іншого екстремального пошкодження, будівля переходить у стан, який не можна оцінити лише візуально. Частина елементів руйнується миттєво. Інші зберігають геометрію, але втрачають частину жорсткості та несучої здатності. В іншому випадку, ситуація ускладнюється пожежним впливом. Висока температура змінює структуру бетону, знижує межу текучості арматури та прискорює розвиток прихованих дефектів. В результаті інженер має справу з неоднорідною просторовою системою, де кожен конструктивний елемент характеризується власним рівнем пошкоженості [8]. Методика оцінки технічного стану в таких умовах повинна бути послідовною, кількісною та відтворюваною. Вона не обмежується описом тріщин або фотофіксацією руйнувань.

1. Ідентифікація пошкоджень після вибухового та термічного впливу. Перший етап спрямований на визначення характеру руйнувань. Для кожного дефекту встановлюються тип пошкодження, геометричні

параметри, зона поширення, глибина проникнення та потенційний вплив на загальну просторову стійкість будівлі [4]. До аналізу включаються механічні руйнування, пробіони, похилі та нормальні тріщини, відшарування захисного шару, оголення арматури, корозійні ушкодження, термічне розтріскування та локальні обвали (рис. 1). Практика показує, що будівлі після вибуху часто мають комбінований характер пошкоджень.



Рис. 1. Характерні пошкодження залізобетонної колони після вибухового впливу: а – локальне руйнування перерізу з горизонтальним зміщенням осі колони на 300 мм, з випучуванням поздовжньої арматури та повним оголенням стрижнів; б – система вертикальних і похилих тріщин з розкриттям у зоні максимальних згинальних деформацій.

Наприклад, ударна хвиля формує миттєві імпульсні навантаження, уламки викликають локальні пробіони, а подальша пожежа знижує характеристики матеріалів [9]. Для стандартизації первинного аналізу використовується методична матриця, наведена в таблиці 1.

Таблиця 1. Класифікація пошкоджень після вибухів, пожеж та ракетних обстрілів

№ з/п	Вид пошкодження	Основний параметр оцінки	Коефіцієнт структурного впливу	Типова причина	Ризик прогресуючого руйнування, %
1	Волосні тріщини	Ширина 0,1-0,3 мм	0,05	Усадка, локальний удар	1
2	Наскрізні тріщини	Ширина 1,0-3,0 мм	0,18	Ударна хвиля	8
3	Похилі тріщини в діафрагмах	Довжина понад 1,5 м	0,32	Перерозподіл зусиль	18

4	Відшарування бетону	Глибина 20-60 мм	0,24	Вибуховий імпульс	12
5	Оголення арматури	Довжина понад 0,5 м	0,39	Сколювання бетону	21
6	Термічна деградація бетону	Температура понад 500 °С	0,46	Пожежа після вибуху	27
7	Корозія арматури	Втрата перерізу понад 10 %	0,41	Вологісний вплив	19
8	Руйнування вузла	Часткова втрата перерізу	0,74	Вибухове перевантаження	63
9	Часткове обвалення перекриття	Площа понад 20 м ²	0,88	Локальна втрата опори	84

Кожному пошкодженню присвоюється числовий код. Після цього обчислюється інтегральний індекс пошкоженості [3]:

$$D_{str} = 1 - \prod_{i=1}^n \left[1 - (w_i \alpha_i^{\beta_i} \gamma_i \delta_i \eta_i) \right] \quad (1)$$

де D_{str} – інтегральний індекс структурної пошкоженості будівлі;

w_i – ваговий коефіцієнт значущості i -го дефекту;

α_i – відносна втрата жорсткості елемента;

β_i – показник нелінійності впливу дефекту;

γ_i – коефіцієнт просторового поширення пошкодження;

δ_i – коефіцієнт динамічного впливу ударної хвилі;

η_i – коефіцієнт взаємодії з суміжними дефектами;

n – кількість зафіксованих пошкоджень.

При значенні D_{str} понад 0,60 будівля класифікується як аварійна.

2. Методика геодезичного та деформаційного контролю. Після кодування пошкоджень визначаються фактичні геометричні зміни конструктивної системи. На цьому етапі застосовують тахеометрію, цифрове нівелювання, лазерне сканування, фотограмметрію та інклінометричний контроль. Методика передбачає побудову опорної геодезичної мережі, прив'язку контрольних точок та формування тривимірної хмари точок [10]. На основі отриманих координат визначаються прогини плит, крени колон, осідання фундаментів, зміщення діафрагм та деформації вузлів. Увагу приділяють будівлям, у яких вибух спричинив втрату окремих вертикальних елементів. У таких випадках

навіть невеликі додаткові переміщення можуть означати розвиток прогресуючого руйнування (рис. 2) [11].



Рис. 2. Схема просторового розташування пошкоджень і зон деформацій на фасаді будівлі

Результати геометричного моніторингу узагальнюються в аналітичній таблиці (табл. 2).

Таблиця 2. Регламент геодезичного та деформаційного контролю пошкоджених будівель

№ з/п	Контрольований параметр	Метод вимірювання	Типова точність	Критичне значення	Інженерна інтерпретація
1	Відхилення колон від вертикалі	Тахеометрія	± 1 мм	> 12 мм	Втрата стійкості
2	Осідання фундаментів	Нівелювання	$\pm 0,3$ мм	> 10 мм	Нерівномірна робота основи
3	Прогини плит	Лазерне сканування	± 2 мм	$> 1/250$	Зниження жорсткості
4	Повороти ригелів	Інклінометри	$\pm 0,0001$ рад	$> 0,002$ рад	Перевантаження вузла

5	Розкриття тріщин	Електронний тріщиномір	±0,02 мм	> 0,4 мм	Активний розвиток дефекту
6	Просторові зміщення	3D-сканування	±3 мм	> 15 мм	Порушення геометрії секції
7	Крен секції	Геодезичний аналіз	±1 мм	> Н/500	Системна нестійкість
8	Деформації зон обвалення	Фотограмметрія	±5 мм	Будь-яке збільшення	Активне руйнування
9	Температурні деформації	Тепловізія	±2 °С	> 80 °С	Залишковий нагрів

В подібних випадках пропонується використовувати розрахунковий Коефіцієнт геометричної стабільності просторової системи:

$$K_{geo} = \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\delta_{adm,j}}{\delta_{fact,j}} \right)^{q_j} \right] \cdot \left(\frac{1}{1 + \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j \theta_j^2}} \right) \quad (2)$$

де K_{geo} – коефіцієнт геометричної стабільності;

$\delta_{adm,j}$ – допустиме значення j -го параметра;

$\delta_{fact,j}$ – фактичне значення параметра;

q_j – показник значущості параметра;

ω_j – ваговий коефіцієнт впливу повороту;

θ_j – кут повороту або перекосу елемента;

m – кількість контрольованих геометричних параметрів.

У випадках, коли $K_{geo} < 1,0$, то геометрична стабільність будівлі не забезпечена.

3. Методика визначення фактичних фізико-механічних характеристик матеріалів. Після екстремальних впливів будівельні матеріали втрачають однорідність. Бетон зазнає мікротріщиноутворення, арматура частково відпускається, кладка деградує через руйнування швів. Через це використання проектних характеристик стає некоректним. Методика передбачає поєднання неруйнівного контролю та лабораторних випробувань (табл. 3).

Таблиця 3. Процес визначення залишкових характеристик матеріалів

№ з/п	Матеріал	Показник	Метод визначення	Мінімальна вибірка	Параметр оцінювання	Типовий діапазон редукції
1	Бетон	Міцність на стиск	Керни ультразвуком	6 зразків	$R_{c,res}$	0,40-0,95
2	Бетон	Модуль пружності	Лабораторні випробування	3 зразки	$E_{c,res}$	0,45-0,90
3	Арматура	Межа текучості	Вирізки та аналіз	3 зразки	$R_{s,res}$	0,75-0,95
4	Арматура	Втрата площі	Геометричний контроль	20 точок	$A_{s,res}$	0,80-1,00
5	Цегла	Міцність на стиск	Пресові випробування	5 зразків	$R_{m,res}$	0,50-0,90
6	Розчин	Міцність	Кубикові зразки	6 зразків	$R_{mort,res}$	0,50-0,85
7	Сталь підсилення	Межа текучості	Твердомір	10 точок	$R_{y,res}$	0,80-0,98
8	Захисний шар	Товщина	Магнітний прилад	30 точок	c_{fact}	Без редукції
9	Корозія	Потенціал	Електрохімічний метод	20 точок	Індекс корозії	Якісна оцінка

Для узагальнення результатів використовується залишковий розрахунковий опір матеріалу після вибуху та пожежі:

$$R_{res} = R_0 \left(\prod_{j=1}^m k_j \right) \exp \left[-\lambda_1 \left(\frac{T_{max} - T_0}{T_{cr} - T_0} \right)^{p_1} - \lambda_2 \left(\frac{\Delta A_s}{A_{s0}} \right)^{p_2} - \lambda_3 \left(\frac{w_{cr}}{w_{lim}} \right)^{p_3} \right] \quad (3)$$

де R_{res} – залишковий розрахунковий опір матеріалу;

R_0 – початковий нормативний опір;

k_j – коригувальні коефіцієнти технологічних та експлуатаційних чинників;

T_{max} – максимальна температура нагріву;

T_0 – початкова температура;

T_{cr} – критична температура деградації;

ΔA_s – втрата площі арматури;

A_{s0} – початкова площа арматури;

w_{cr} – фактична ширина розкриття тріщин;

w_{lim} – гранично допустима ширина тріщин;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – параметри чутливості;

p_1, p_2, p_3 – показники степеневі залежності.

4. Методика інтегрального оцінювання залишкової несучої здатності. Заключний етап полягає в інтеграції всіх отриманих параметрів. Дані про пошкодження, деформації та властивості матеріалів об'єднуються в єдину систему показників. На її основі визначається коефіцієнт залишкової несучої здатності [5].

$$\eta_R = \frac{\sum_{k=1}^s [N_{u,k}^{res} \phi_k \psi_k]}{\sum_{k=1}^s [N_{Ed,k} \chi_k]} \cdot (1 - D_{str})^\mu \cdot K_{geo}^v \quad (4)$$

де η_R – узагальнений коефіцієнт залишкової несучої здатності будівлі;

$N_{u,k}^{res}$ – залишкова гранична здатність k -го елемента;

$N_{Ed,k}$ – розрахункове навантаження на елемент;

ϕ_k – коефіцієнт конструктивного резерву;

ψ_k – коефіцієнт перерозподілу зусиль;

χ_k – коефіцієнт динамічного збільшення навантаження;

D_{str} – інтегральний індекс пошкоженості;

K_{geo} – коефіцієнт геометричної стабільності;

μ, v – параметри чутливості системи;

s – кількість розрахункових елементів.

Якщо $\eta_R \geq 1,0$, конструктивна система забезпечує нормативну надійність. При значеннях від 0,75 до 1,0 потрібне підсилення. Якщо показник менший за 0,75, будівля потребує негайних протиаварійних заходів, часткового демонтажу або повної реконструкції.

Цифрове моделювання починається з формування геометричної основи. До моделі імпортуються результати лазерного сканування, координати контрольних точок, контури фактичних руйнувань та карти пошкоджень. Для кожної колони, ригеля, діафрагми та плити задаються індивідуальні характеристики матеріалу. Частина елементів отримує редуковані модулі пружності, інші виключаються повністю [12, 13]. Для інтегральної оцінки редукованої жорсткості конструктивного елемента застосовується така залежність:

$$K_e^* = \frac{E_{b,res} I_{b,res} + \sum_{j=1}^m E_{s,j} A_{s,j} z_j^2}{E_{b,0} I_{b,0} + \sum_{j=1}^m E_{s,j}^0 A_{s,j}^0 z_j^2} \cdot \exp \left[-\alpha_T \left(\frac{T_{max}}{T_{cr}} \right)^{p_1} - \alpha_c \left(\frac{\Delta A_s}{A_{s,0}} \right)^{p_2} - \alpha_w \left(\frac{w_{cr}}{w_{lim}} \right)^{p_3} \right] \quad (5)$$

де K_e^* – коефіцієнт залишкової жорсткості елемента;

$E_{b,res}$ – фактичний модуль пружності бетону;

$I_{b,res}$ – фактичний момент інерції бетонного перерізу;

$E_{s,j}$ – модуль пружності j -го арматурного стрижня;

$A_{s,j}$ – фактична площа арматури;

z_j – відстань від стрижня до нейтральної осі;

$E_{b,0}$ – початкові проектні характеристики;

T_{max} – максимальна температура нагріву;
 T_{cr} – критична температура деградації;
 ΔA_s – втрата площі арматури;
 w_{cr} – фактичне розкриття тріщин;
 w_{lim} – граничне допустиме розкриття;
 $\alpha_T, \alpha_C, \alpha_w$ – коефіцієнти чутливості.

Як видається, саме цей показник найкраще передає реальний ступінь послаблення конструкції. У розрахунках для пошкоджених колон коефіцієнт K_e^* коливався від 0,28 до 0,74. Тобто окремі елементи втратили понад 70 % початкової жорсткості. Після редукції параметрів створюється тривимірна скінченно-елементна модель. Для багатоповерхових житлових будинків типова модель містить від 180 до 450 тис. вузлів (табл. 4).

Таблиця 4. Параметричне наповнення цифрової FEM-моделі пошкодженої будівлі

№ з/п	Параметр моделі	Джерело даних	Типова кількість значень	Діапазон зміни	Спосіб урахування
1	Геометрія елементів	Лазерне сканування	10^5 – 10^6 координат	Фактична	Імпорт CAD-моделі
2	Модулі пружності	Лабораторні випробування	50–300	8–32 ГПа	Індивідуально
3	Втрата арматури	Розкриття конструкцій	100–500 точок	0–25 %	Редукція площ
4	Температурні зони	Тепловізія та експертиза	10–40 зон	20–900 °C	Коефіцієнти деградації
5	Тріщини	Карти дефектів	200–2000	0,1–8,0 мм	Зниження жорсткості
6	Демонтовані елементи	Польове обстеження	1–50	Повна втрата	Видалення з моделі
7	Тимчасові підпори	Проект стабілізації	5–100	Фактична жорсткість	Додаткові елементи
8	Імпульсні навантаження	Аналіз вибуху	10–100 сценаріїв	50–500 кПа	Динамічний розрахунок
9	Повторні експлуатаційні навантаження	Нормативні дані	Повний набір	Стандартні	Комбінації навантажень

У реальних розрахунках фіксуються не лише максимальні напруження. Аналізується карта пластичних деформацій, зміни жорсткості

по поверххах, послідовність руйнування вузлів та темпи зростання переміщень [14]. Для монолітних будівель особливо небезпечними виявляються локальні концентрації зусиль у вузлах сполучення колон і плит, де напруження можуть перевищувати середній рівень у 2,5-4,0 рази (рис. 3.).



Рис. 3. Характерні пошкодження плит перекриття та вертикальних елементів каркаса після вибухового та ударного навантаження

Для інтегрального оцінювання залишкової несучої здатності просторової системи застосовується така багатофакторна залежність:

$$\eta_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{u,i}^{res} \phi_i \psi_i \omega_i)}{\sum_{i=1}^n (S_{Ed,i} \chi_i)} \cdot \left(\prod_{k=1}^m K_{e,k}^* \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \exp \left[-\beta_1 D_p - \beta_2 \frac{\sum V_{pl}}{V_{tot}} - \beta_3 P_{col} \right] \quad (6)$$

де η_{sys} – інтегральний коефіцієнт залишкової несучої здатності будівлі;

$R_{u,i}^{res}$ – залишкова гранична здатність i -го елемента;

$S_{Ed,i}$ – розрахункове зусилля в елементі;

ϕ_i – коефіцієнт конструктивного резерву;

ψ_i – коефіцієнт перерозподілу навантажень;

ω_i – коефіцієнт дублювання силових шляхів;

χ_i – коефіцієнт динамічного збільшення зусиль;

$K_{e,k}^*$ – коефіцієнт залишкової жорсткості k -го елемента;

D_p – інтегральний індекс пошкоженості;

$\sum V_{pl}/V_{tot}$ – частка пластично деформованого об'єму;

P_{col} – імовірність прогресуючого обвалення;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – параметри чутливості.

При η_{sys} нижче 0,85 експлуатація без підсилення вважається недопустимою. Значення менше 0,60 означає, що конструктивна система втратила достатній запас надійності [15]. Для пошкоджених будівель найбільшу практичну цінність мають три цифрові модулі. Перший модуль автоматично розпізнає тріщини, зони обвалення та ділянки термічного руйнування на основі фотограмметричних даних. Другий модуль прогнозує зміну характеристик матеріалів у часі. Третій модуль ранжує сценарії відновлення з урахуванням технічних, часових та економічних критеріїв. Для прогнозування технічного стану через заданий часовий інтервал застосовується багатопараметрична модель деградації:

$$I_t = I_0 \cdot \exp \left[- \int_0^t (\lambda_T T(\tau)^{a_1} + \lambda_H H(\tau)^{a_2} + \lambda_C C(\tau)^{a_3} + \lambda_S S(\tau)^{a_4}) d\tau \right] \cdot (1 - \rho_{rep})^\mu \quad (7)$$

де I_t – прогнозний індекс технічного стану на момент часу t ;

I_0 – початковий індекс технічного стану після обстеження;

$T(\tau)$ – температурний вплив у момент часу τ ;

$H(\tau)$ – вологісний вплив;

$C(\tau)$ – корозійний фактор;

$S(\tau)$ – повторні експлуатаційні навантаження;

$\lambda_T, \lambda_H, \lambda_C, \lambda_S$ – коефіцієнти деградації;

a_1, a_2, a_3, a_4 – показники нелінійності;

ρ_{rep} – частка відновленого конструктивного ресурсу;

μ – коефіцієнт ефективності ремонтних заходів.

За допомогою наведеної моделі визначають строки повторного обстеження та прогнозують момент, коли конструкція досягне критичного стану. Для будівель із локальними пошкодженнями індекс технічного стану часто знижується на 3-5 % щороку. Для конструкцій, що зазнали одночасно вибухового та пожежного впливу, темп деградації може бути втричі вищим. Результати цифрового прогнозування зручно подавати у вигляді порівняльної матриці сценаріїв (табл. 5).

Таблиця 5. Автоматизоване ранжування сценаріїв відновлення пошкодженої будівлі

№ з/п	Сценарій відновлення	Коефіцієнт залишкової здатності після робіт	Прогнозний строк служби, років	Тривалість реалізації, діб	Відносні витрати	Підсумковий рейтинг
1	Локальний ремонт тріщин	0,84	8	18	0,22	0,54

2	Підсилення колон композитами	1,03	22	34	0,48	0,86
3	Влаштування сталевих обойм	1,08	28	41	0,62	0,91
4	Заміна пошкоджених плит	1,11	30	57	0,74	0,89
5	Комбіноване підсилення	1,19	40	63	0,88	0,97
6	Частковий демонтаж секції	1,00	25	95	1,12	0,72
7	Повна реконструкція	1,26	50	180	1,85	0,83
8	Повний демонтаж і нове будівництво	1,35	75	320	3,40	0,79

Як видно з таблиці 5, комбіноване підсилення часто забезпечує найкраще співвідношення між технічним результатом і витратами. Воно включає заміну критичних елементів, підсилення колон, ін'єктування тріщин і відновлення просторової жорсткості діафрагм. Для остаточного вибору технічного рішення використовується інтегральний критерій ефективності:

$$E_{opt} = \omega_1 \eta_{sys} + \omega_2 \frac{L_{pred}}{L_{max}} + \omega_3 \left(1 - \frac{C_i}{C_{max}} \right) + \omega_4 \left(1 - \frac{T_i}{T_{max}} \right) + \omega_5 (1 - P_{col}) \quad (8)$$

де E_{opt} – інтегральний критерій ефективності варіанта відновлення;

η_{sys} – коефіцієнт залишкової несучої здатності після робіт;

L_{pred} – прогнозний строк подальшої експлуатації;

L_{max} – максимальний строк серед розглянутих варіантів;

C_i – вартість i -го варіанта;

C_{max} – найбільша вартість;

T_i – тривалість реалізації;

T_{max} – найбільша тривалість;

P_{col} – імовірність прогресуючого обвалення;

$\omega_1 \dots \omega_5$ – вагові коефіцієнти критеріїв.

Сценарій з найбільшим значенням E_{opt} приймається як пріоритетний. Представлений методичний підхід формує завершений інженерний цикл. Спочатку створюється параметризована цифрова модель з урахуванням фактичних пошкоджень. Далі виконується нелінійний аналіз напружено-деформованого стану та визначається коефіцієнт залишкової несучої здатності. У підсумку, експерт отримує не окремі розрахунки, а цілісну систему кількісно обґрунтованих показників, достатню для вибору оптимального рішення щодо ремонту, підсилення, реконструкції або демонтажу пошкодженої будівлі (частин будівлі).

Висновки

Інтеграція фотофіксації, лазерного сканування, геодезичного контролю, неруйнівних випробувань і лабораторних досліджень властивостей бетону та арматури формує узгоджену систему вихідних параметрів для подальшого чисельного аналізу. Результати практичних розрахунків засвідчують, що падіння модуля пружності бетону в межах від 45 до 60 відсотків разом із втратою площі арматурного перерізу, що перевищує 15%, знижує локальну жорсткість окремих елементів до рівня від 0,30 до 0,70 від номінального проектного значення.

Розрахунковий алгоритм ґрунтується на нелінійному скінченно-елементному моделюванні, яке відтворює наявні дефекти, наслідки температурного впливу та виключає з розрахункової схеми зруйновані ділянки. Така постановка задачі дозволяє точно локалізувати зони концентрації напружень, оцінити частку пластичних деформацій та визначити коефіцієнт залишкової несучої здатності всієї конструктивної системи. Так зниження коефіцієнта залишкової несучої здатності нижче значення 0,85 вказує на обов'язкову потребу в конструктивному підсиленні, тоді як показник менший за 0,60 свідчить про доцільність часткового демонтажу або комплексної реконструкції.

Розроблений інструмент цифрового прогнозування супроводжується багатокритеріальним ранжуванням сценаріїв відновлення, у якому зіставляються залишкова несуча здатність, очікуваний строк експлуатації, строки виконання робіт, фінансові витрати та ризик розвитку прогресуючого обвалення. Апробація методики на реальних об'єктах засвідчила, що комплексне підсилення колон, плит перекриття та вертикальних діафрагм дозволяє підвищити коефіцієнт несучої здатності до рівня від 1,15 до 1,20 і гарантує прогнозний експлуатаційний ресурс не менше 35 років.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший,

який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

(Або вказати офіційні вихідні дані теми державної науково-дослідної роботи, гранту тощо)

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Shatov, S. V., Bohachenko, S. V., & Rudin, A. A. (2023). Diahnostyka tekhnichnoho stanu budivelnnykh konstruksii, yaki zaznaly neproiektnykh vplyviv vybukhovoho kharakteru. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*, 2(14), 100–110. <http://dx.doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.100.937>

2. Serhiichuk, V. A., Tabarkevych, N. V., Bielokon, A. M., & Tabarkevych, O. O. (2023). Osoblyvosti obstezhennia ta otsinky tekhnichnoho stanu zhytloвого budynku, poskodzhenoho vnaslidok viiskovykh dii, shchodo yoho prydatnosti do podalshoi ekspluatatsii. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 1, 4–13. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-4>

3. Serhiichuk, V. A., Yakovenko, M. M., Nesterenko, O. V., Zorin, Ye. O., & Ben, I. O. (2024). Heo8. dezynchne zabezpechennia kompleksu robiz z obstezhennia budivel, shcho postrazhdaly vnaslidok viiskovykh dii na prykladi ZhK "Dynastiia" v m. Kyievi. *Nauka ta budivnytstvo*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-1>

4. Berchun, Ya. O., Telychko, R. I., & Klymenkov, O. A. (2025). Otsinka zminy tekhnichnoho stanu ponivechenykh bahatopoverkhovykh budivel za dopomohoiu shtuchnoho intelektu. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 2, 185–198. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.185-198>

5. Kushnir, O., Kushnir, V., Grynyova, I., & Bichev, I. (2025). Investigation of the stress-strain state of building structures damaged by emergency situation. *Modern Construction and Architecture*, 12, 65–80. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-12-65-80>

6. Nuzhnyi, V., & Koliakova, V. (2025). Analysis of some cases residential buildings destruction as a result of combat actions. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 17, 189–199. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.17.2025.189-199>

7. Shekhovtsov, V., Fesenko, O., Malakhov, V., & Dmytrenko, Y. (2025). Assessment and repairment of the reinforced concrete structures damaged due to Russian missile attack. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 16, 135–144. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.135-144>

8. Berezovskyi, A. V., Dzhulai, O. A., Rudeshko, I. V., Chornomaz, I. V., & Vykhrystenko, V. V. (2024). Osoblyvosti tekhnichnoho obstezhennia budivel i sporud, shcho byly poshkodzeni abo zruinovani vnaslidok viiskovykh dii. *Nadzvychnaini sytuatsii: Poperedzhennia ta likvidatsiia*, 8(2), 5–14. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.5.14>

9. Melashenko, Yu. B., Sliusarenko, Yu. S., Ishchenko, Yu. V., & Pavliuk, Ye. M. (2023). Dosvid obstezhennia panelnykh budynkiv, poshkodzenykh vnaslidok boiovykh dii. *Nauka ta budivnytstvo*, 36(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-5>

10. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunenko, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>

11. Donets, T. (2024). Kharakterystyka poshkodzen budivel z riznymy konstruktivnymi systemamy vnaslidok voiennykh dii. *Nauka ta budivnytstvo*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-6>

12. DBN V.2.2-5:2023. (2023). Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu. Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3189167248606157714/2023-11-01/56d2692b-4667-4ca8-a06c-a4fdb13f9fce.pdf

13. Semko, O., Vynnykov, Y., Filonenko, O., Yurin, O., Ilchenko, T., Hranko, O., Semko, V., Salles, A., Mateus, R., & Mahas, N. (2025). Perspectives of industrialized construction for post-war housing recovery and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 17(5), Article 2264. <https://doi.org/10.3390/su17052264>

14. Farenjuk, H. H., Zelenko, Ye. V., & Sliusarenko, Yu. S. (2025). Perspektyvy industrialnoho budivnytstva dlia vidnovlennia zhytla, zruinovanoho vnaslidok viiskovoi ahresii. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 1, 1–11. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2025-1>

15. DSTU 9273:2024. (2024). Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsiniuvannia yikhnoho tekhnichnoho stanu. *Mekhanichnyi opir ta stiikist. DP "UkrNDNTs"*. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_9273_2024.pdf

Література

1. Шатов, С. В., Богаченко, С. В., & Рудін, А. А. (2023). Діагностика технічного стану будівельних конструкцій, які зазнали непроєктних впливів вибухового характеру. *Український журнал будівництва та архітектури*, 2(14), 100–110. <http://dx.doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.100.937>

2. Сергійчук, В. А., Табаркевич, Н. В., Белоконь, А. М., & Табаркевич, О. О. (2023). Особливості обстеження та оцінки технічного стану житлового будинку, пошкодженого внаслідок військових дій, щодо його придатності до подальшої

експлуатації. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 1, 4–13. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-4>

3. Сергійчук, В. А., Яковенко, М. М., Нестеренко, О. В., Зорін, Є. О., & Бень, І. О. (2024). Геодезичне забезпечення комплексу робіт з обстеження будівель, що постраждали внаслідок військових дій на прикладі ЖК «Династія» в м. Києві. *Наука та будівництво*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-1>

4. Берчун, Я. О., Теличко, Р. І., & Клименков, О. А. (2025). Оцінка зміни технічного стану понівечених багатоповерхових будівель за допомогою штучного інтелекту. *Містобудування та територіальне планування*, 2, 185–198. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.185-198>

5. Kushnir, O., Kushnir, V., Grynyova, I., & Bichev, I. (2025). Investigation of the stress-strain state of building structures damaged by emergency situation. *Modern Construction and Architecture*, 12, 65–80. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-12-65-80>

6. Nuzhnyi, V., & Koliakova, V. (2025). Analysis of some cases residential buildings destruction as a result of combat actions. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 17, 189–199. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.17.2025.189-199>

7. Shekhovtsov, V., Fesenko, O., Malakhov, V., & Dmytrenko, Y. (2025). Assessment and repairment of the reinforced concrete structures damaged due to Russian missile attack. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 16, 135–144. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.135-144>

8. Березовський, А. В., Джулай, О. А., Рудешко, І. В., Чорномаз, І. В., & Вихристенко, В. В. (2024). Особливості технічного обстеження будівель і споруд, що були пошкоджені або зруйновані внаслідок військових дій. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*, 8(2), 5–14. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.5.14>

9. Мелашенко, Ю. Б., Слюсаренко, Ю. С., Іщенко, Ю. В., & Павлюк, Є. М. (2023). Досвід обстеження панельних будинків, пошкоджених внаслідок бойових дій. *Наука та будівництво*, 36(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-5>

10. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>

11. Донець, Т. (2024). Характеристика пошкоджень будівель з різними конструктивними системами внаслідок воєнних дій. *Наука та будівництво*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-6>

12. ДБН В.2.2-5:2023. (2023). Захисні споруди цивільного захисту. *Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України*. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3189167248606157714/2023-11-01/56d2692b-4667-4ca8-a06c-a4fdb13f9fce.pdf

13. Semko, O., Vynnykov, Y., Filonenko, O., Yurin, O., Ilchenko, T., Hranko, O., Semko, V., Salles, A., Mateus, R., & Mahas, N. (2025). Perspectives of industrialized

construction for post-war housing recovery and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 17(5), Article 2264. <https://doi.org/10.3390/su17052264>

14. Фаренюк, Г. Г., Зеленко, Є. В., & Слюсаренко, Ю. С. (2025). Перспективи індустріального будівництва для відновлення житла, зруйнованого внаслідок військової агресії. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 1, 1–11. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2025-1>

15. ДСТУ 9273:2024. (2024). Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. ДП «УкрНДНЦ». https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_9273_2024.pdf

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 15.05.2026	Received 15.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 19.05.2026	Received in revised form 19.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

I. S. Chernov

Ph.D. in Technical Sc., Senior Lecturer ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-1006>
Department of Processes and Apparatuses for Construction Materials Production,
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
4 Didrikhsona St, Odesa, Ukraine, 65029

E. A. Darmofal*

Ph.D. in Technical Sc., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1160-8850>
Department of Ecology and Technogenic Safety
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
17 Vadymo Manka St, Kharkiv, Ukraine, 61070

I. O. Kadykalo

Ph.D. in Technical Sc., Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5686-5869>
Department of Machine and Equipment Design
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
15 Heroiv Oborony St, Kyiv, Ukraine, 03041

*corresponding author, e-mail: elyadarmofal@gmail.com

Methods for Assessing the Technical Condition of Buildings after Extreme Impacts

How to Cite: Chernov, I. S., Darmofal, E. A., & Kadykalo, I. O. (2026). Methods for assessing the technical condition of buildings after extreme impacts. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, 25, 265-283. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-20)

Abstract. The article examines methodological approaches to assessing the technical condition of buildings after blast and thermal impacts. The proposed system combines field inspections, geodetic measurements, and laboratory testing of materials. Special attention is given to integrating the collected data into a unified computational model. The study begins with identifying damage types and determining their geometric

characteristics. Based on the obtained information, an integral structural damage index is formed. Spatial monitoring of deformations is carried out using laser scanning and tachometric surveys. Materials are investigated using combined methods. Reductions in the strength of concrete and reinforcement caused by high temperatures and corrosion are taken into account. The developed mathematical relationships make it possible to calculate the residual design resistance and the load-bearing capacity coefficient. The parameterized digital model reproduces actual service conditions. It accounts for stiffness reduction, local failures, and the probability of progressive collapse. Nonlinear stress analysis determines threshold values for engineering decision-making. The resulting indicators identify the need for strengthening or complete reconstruction. A separate section is devoted to forecasting changes in the condition of structures over time. The proposed algorithm ranks recovery options according to technical and economic criteria. Practical implementation of the methodology confirmed its effectiveness. The obtained quantitative indicators provide a substantiated choice between repair and demolition. The study forms a scientific basis for the safe operation of damaged facilities. The results can be used in the development of regulatory documents and engineering recovery projects. The research establishes a foundation for the further development of the theory of structural stability assessment under complex service conditions. The scientific novelty lies in the systematization of instrumental data and their adaptation to modern computational standards. Validation of the approach on real facilities demonstrated a high level of agreement between calculated values and the actual condition of structural elements.

Keywords: technical inspection of buildings, blast damage, residual load-bearing capacity, finite element modeling, progressive collapse, structural rehabilitation, prevention of man-made risks.

UDC 624.154:624.138

I. A. Arutiunian

Doctor of Science in Engineering, Professor, Head, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5049-3742>
Department of Industrial and Civil Engineering
Zaporizhzhia National University, Sobornyi Avenue, 226, Zaporizhzhia, Ukraine 69000

K. M. Mishuk*

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-5480-6032>

Department of Industrial and Civil Engineering
Zaporizhzhia National University, Sobornyi Avenue, 226, Zaporizhzhia, Ukraine 69000

Y. E. Arutiunian

PhD, Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0502-6651>

Urban Construction and Architecture Department
Zaporizhzhia National University, Sobornyi Avenue, 226, Zaporizhzhia, Ukraine 69000

*corresponding author, e-mail: mishukivk@gmail.com

Enhancing the compressive strength of soil-cement piles via drill string kinematics optimization in deep mixing

How to Cite:

Arutiunian, I. A., Mishuk, K. M., Arutiunian, Y. E. (2026). Enhancing the compressive strength of soil-cement piles via drill string kinematics optimization in deep mixing. *Modern Technologies and Methods of Calculations in Construction*, 25, 284-296. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-21](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-21)

© 2026, Authors. Published under the guidelines of the CC BY 4.0 license

Abstract. This study proposes an improved method for manufacturing soil-cement piles using deep soil mixing (DSM) technology to increase the bearing capacity and durability of foundations in soft soils. The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency of the arrangement of bases and foundations in complex engineering and geological conditions, where traditional methods of soil reinforcement do not always provide the proper strength and homogeneity of the massif. The study presents a conceptual model of local compaction, which considers the borehole as a combined mechanical-hydraulic system, which allows for a more accurate description of the process of forming a soil-cement element and controlling its physical and mechanical properties. This approach integrates continuous injection of cement mortar with discrete reverse movements of the drill string every 350-400 mm, which ensures intensification of the mixing and compaction process of the soil-cement mixture throughout the depth of the borehole. This technological scheme contributes to the formation of a denser and more homogeneous structure of the material, reducing porosity and increasing the adhesive properties between soil particles and cement stone. Laboratory tests on clay, loam and sandy loam (cement content 10-20%) confirmed that stepped compaction increases the compressive strength by up to 47% (nearly 1.5 times), reaching 12.9 MPa

for clay and 15.2 MPa for sandy loam, which indicates the high efficiency of the proposed method.

The results of the studies show that a compaction step exceeding 400 mm leads to structural heterogeneity and a decrease in the operational characteristics of piles, while the optimal interval provides maximum density and uniform distribution of stresses in the array. In addition, it was found that control of process parameters (tool lifting speed, mortar consumption, multiplicity of reverse movements) is of crucial importance for achieving stable results in field conditions. The technology reduces resource consumption by 25-35% due to the effective use of local soils, reduced cement and energy costs, and reduced work duration.

The proposed approach provides a resource-saving and environmentally sound solution for the construction of foundations and retaining walls in difficult geotechnical conditions, and also has the potential for widespread implementation in civil and industrial construction practice. The results obtained can be used in the development of regulatory recommendations and improvement of technological regulations for the performance of deep soil mixing works.

Keywords: soil-cement pile, Deep Soil Mixing (DSM), cement slurry, local compaction, drill string kinematics, bearing capacity

Introduction

Analysis of literary sources and problem statement. Recent studies [3-6] prove that the physical and mechanical characteristics of soil-cement critically depend on the technological operating parameters of the drilling rig. In particular, a recent study [1] demonstrated a direct relationship between the mixing energy transferred to the soil and the final unconfined compressive strength (UCS) of the stabilized mass.

The conventional pile manufacturing method involves continuous reverse rotation and lifting of the drill string with the simultaneous injection of cement slurry. Such continuous lifting kinematics often fail to provide a sufficient level of mixing energy in local areas, leading to the formation of under-compacted soil layers and uncontrolled filling of the borehole.

To address the problem of insufficient local compaction and a low degree of homogeneity, optimized drill string kinematics are proposed. The innovative approach consists of changing the reverse stroke algorithm: instead of continuous tool withdrawal, the upward movement of the string is carried out with stops every 350...400 mm of the borehole height. Meanwhile, the injection of the cement slurry occurs continuously.

Such a step-wise method allows for a radical change in the distribution of mixing energy. Periodic stops ensure the maximum possible penetration of the dosed cement slurry into the soil and its forced mechanical compaction directly under the expanding blades of the drill string. This creates conditions for additional cement saturation of both the remaining soil and the soil additionally

cut from the borehole walls, significantly improving the structure of the final material.

Research aim and objectives. Although the conceptual mechanism of stepwise extraction of the drill string has been previously patented by the authors [2], its actual physical and mechanical effects on different types of soils have remained uncertain. The main objective of this study is to address the problem of structural heterogeneity in traditional deep soil mixing (DSM) by experimentally verifying this patented technology. In particular, this study aims to evaluate how optimizing the tool kinematics increases the local mixing energy, and presents the first comprehensive quantification of the strength increase of clay, loam, and sandy soils. In addition, the study scientifically substantiates the optimal kinematic parameters (step size) required for maximum local compaction.

Materials and methods

1. Characteristics of raw materials

To conduct the complex of experimental studies and physical modeling of the deep mixing process, three types of soil were selected: clay, loam, and sandy loam. The selection of these specific materials is justified by the fact that they are the most common components of structurally unstable foundation soils that require stabilization in actual construction practice. Portland cement was used as the inorganic binder to form the soil-cement matrix. To evaluate the effectiveness of the proposed technology at various levels of stabilizer saturation, the experimental program included three binder dosage variants: 10%, 15%, and 20% of Portland cement relative to the soil mass. Such a dosage range allowed for the construction of representative curves showing the dependence of strength on cement content.

2. Experimental design and modeling of manufacturing conditions

To identify the most critical factors influencing the structure formation conditions on the final strength of the soil-cement, samples were prepared in parallel in two series:

1) Control series (without compaction): modeled the conventional algorithm for manufacturing soil-cement piles with continuous mixing without creating additional compaction pressure.

2) Experimental series (with compaction): modeled the proposed innovative step-wise method of manufacturing piles with local compaction.

3) Algorithm of optimized kinematics and pile formation Physical modeling of the proposed method was based on modifying the kinematics of the working tool and included the following technological stages:

- Preparatory stage: drilling the initial borehole without bringing the soil to the surface.

- Expansion and mixing stage: additional expansion of the borehole was carried out by cutting the soil from its walls using the expanding blades of the drill string. Simultaneously, cement slurry was continuously injected into the borehole and intensively mixed with the soil.

- Step-wise compaction stage (core innovation): unlike conventional methods, the reverse movement (lifting) of the drill string was not continuous, but was carried out with strictly regulated stops every 350...400 mm of the borehole height. The slurry injection was not interrupted but occurred in a dosed manner during these stops (Table 1).

Table 1. Experimental design matrix

Test series	Modeling conditions (Tool kinematics)	Soils under investigation	PC content (% by soil mass)	Output controlled parameter
Series 1: Control (without compaction)	Traditional: continuous reverse movement of the drill string without additional stops for crimping	Clay	10	Compressive strength (MPa)
		Loam	15	
		Sandy loam	20	
Series 2: Experimental (with compaction)	Innovative: discrete movement with stops every 350...400 mm of height and dosed injection	Clay	10	Compressive strength (MPa)
		Loam	15	
		Sandy loam	20	

4. Local compaction mechanism and parameter control

The saturation of the remaining and cut soil with cement, as borehole as its compaction, was achieved specifically due to the stop of the drill string's reverse stroke. This pause ensured the maximum possible penetration of the cement slurry under pressure and the physical compaction of the formed soil-cement mixture directly under the cutting blades. The duration of the saturation

and local compaction process at each step was not fixed in time but was determined by the moment the flow of cement slurry into the formed mixture ceased. The time for resuming the upward movement of the drill string was recorded upon the termination of the slurry supply, which was monitored using the meter readings on the slurry pipeline. The limit parameters of the step were established empirically: stops of the drill string after lifting to a height of more than 400 mm demonstrated the presence of an under-compacted soil layer between the steps. At the same time, reducing the step height to less than 350 mm proved impractical, as the strength of the formed soil-cement remained unchanged, which would only increase the overall execution time.

5. Test Procedure and Sample Preparation

The experimental program included physical simulation of the DSM process in laboratory conditions. Soil and cement samples were cast into standard cubic molds with dimensions of 100×100×100 mm. For each combination of soil type, cement content and production method (control and experimental series), a batch of 3 replicates was prepared to ensure statistical reliability. The cast samples were cured under normal humidity conditions (temperature 20±2 °C, relative humidity > 95%) for 28 days. The general view and structural texture of the prepared soil-cement cubic specimens before mechanical testing are shown in Fig. 1.

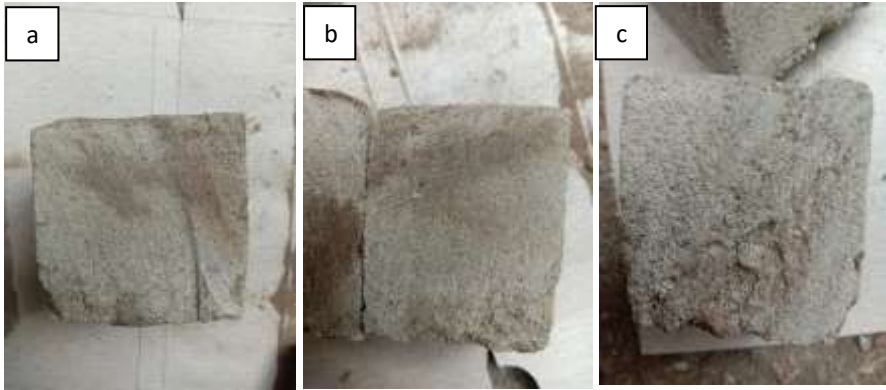


Fig. 1. General view and structural macrotecture of soil-cement specimens (100x100x100 mm): a – clay-cement specimen; b – loam-cement specimen; c – sandy loam-cement specimen

Mechanical tests for unconfined compressive strength were performed using a standard hydraulic testing machine at a constant loading rate of 0.6±0.2 MPa/s. Considering that soil cement with a high binder content (10-20%)

exhibits quasi-brittle behavior similar to low-quality concrete, the test procedure, end surface preparation and statistical processing of the results were performed in accordance with the national standard of Ukraine DSTU B V.2.7-214:2009. The values of the unconfined compressive strength presented in Table 2 are the arithmetic mean of the test results for each series of samples.

Results and discussion

1. Visualization and analysis of the innovative tool kinematics

The fundamental basis for the obtained results is the change in the mechanism of interaction between the drill string and the soil during pile formation. The conceptual diagram of the innovative working tool and the step-wise compaction kinematics, developed based on the patent, is presented in Figure 2.

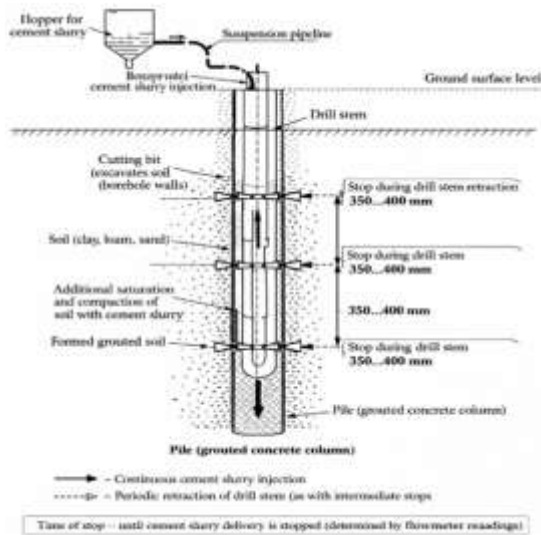


Fig. 2. Conceptual diagram of the innovative drill string and step compaction kinematics

An analysis of Figure 1 allows for a clear tracing of the physics of the proposed process. In the conventional continuous DSM method, which is based solely on the rotation and lifting speeds, the mixing energy is distributed uniformly along the entire length. This is often insufficient for breaking down local soil agglomerates, especially in clayey soils.

In contrast, the proposed step-wise algorithm (with stops every 350...400 mm) transforms the blade kinematics into a cyclic process of local compaction.

Stopping the upward movement of the drill string while continuously injecting the cement slurry creates conditions for mechanical-hydraulic compaction directly within the layer of the soil-cement mixture beneath the cutting blades. This ensures a radical increase in local mixing energy and the forced penetration of the dosed slurry into the pores of the remaining and additionally cut soil. Such a regime allows for the elimination of the primary drawback of DSM-the presence of under-compacted layers-and the formation of a strengthened contact zone between the steps.

2. Quantitative assessment of the strength improvement of soil-cement foundations

The primary criterion for the effectiveness of the proposed technology is the unconfined compressive strength (UCS). The results of experimental studies conducted for three types of soil and three levels of cement dosage (10%, 15%, 20%) are presented in Table 2.

Table 2. Unconfined compressive strength (UCS) for different test series

Soil Type	Cement content (% by soil mass)	UCS (Series 1: Control without compaction), MPa	UCS (Series 2: Experimental with compaction), MPa	Strength increase, %
Clay	10	4,8	6,5	35,4
	15	7,1	9,8	38,0
	20	9,4	12,9	37,2
Loam	10	5,5	7,9	43,6
	15	8,0	11,2	40,0
	20	10,1	14,0	38,6
Sandy loam	10	6,2	9,1	46,8
	15	9,0	12,5	38,9
	20	12,1	15,2	25,6

3. Analysis and discussion of physical and mechanical changes in the structure. A comparative analysis of the data in Table 2 demonstrates a significant positive impact of the optimized kinematics on the soil-cement strength for all investigated soil types and cement dosages. On average, the use of the step-wise compaction method allows for an increase in compressive strength by up to 47% compared to the conventional method.

3.1. Impact on clayey and loamy soils. The highest rates of relative strength increase were recorded for loam (up to 43,6%) and clay (up to 38,0%). This is scientifically explained by the fact that clay particles have a complex

porous structure and high cohesion. In conventional DSM, the cement slurry often fails to penetrate deep into the soil agglomerates, creating an «encapsulation effect», where the cement reacts only on the surface of the particles.

Mechanical-hydraulic compaction during the drill string stops destroys these agglomerates, ensuring deeper slurry penetration. Dosed cement injection (for instance, the increase in clay strength with 20% cement from 9,4 to 12,9 MPa) results from pore space optimization and the formation of a denser crystalline lattice. The additional contact time between the slurry and the soil under pressure promotes more complete hydration and the formation of new cementing bonds.

3.2. Impact on sandy loam soils. For sandy loam, which by nature has lower cohesion and higher permeability, the compaction effect is also significant, but the relative increase is lower (up to 46,8% at 10% cement and 25,6% at 20% cement). This is due to the fact that sand particles are less prone to agglomeration.

However, the step-wise method still improves the bearing capacity through a more uniform distribution of cement along the entire length of the pile. The high compressive strength in sandy loam (up to 15,2 MPa at 20% cement) emphasizes that local compaction allows for the maximum utilization of the local soil's load-bearing potential.

3.3. Substantiation of the optimal compaction step. A vital scientific conclusion is the experimental confirmation of the limit step values (stops every 350...400 mm), as specified in the patent [2]. It was established that stops at a step exceeding 400 mm lead to the formation of local under-compacted soil layers between steps, which significantly reduces the pile's homogeneity and water resistance. This confirms that the effective radius of local compaction under the cutting blades is limited to this range.

At the same time, reducing the step to less than 350 mm did not lead to a further increase in strength, as the soil matrix was already maximally saturated with the slurry. Such a regime would only unjustifiably increase the execution time and resource consumption. Therefore, the range of 350...400 mm is optimal in terms of the balance between strength and productivity.

4. Assessment of resource-saving potential and environmental feasibility. In modern construction, increasing strength is only one of the goals; cost optimization is equally important. A cost reduction of 25-35% was confirmed through calculation, the results of which are presented in Table 3.

Resource savings of 25-35% (specifically, cement savings of 22.5-30,0% to achieve the same design strength) are a direct result of increased mixing efficiency and homogeneity.

Table 3. Calculated economic efficiency of the step-wise method

Soil Type	Parameter	Conventional DSM Method (Control)	Proposed Step-wise DSM Method (Experiment)	Resource Savings, %
Clay	Design strength, MPa	10	10	-
	Required cement content, %	20	15,5	22,5
Sandy loam	Design strength, MPa	12	12	-
	Required cement content, %	20	14	30,0

Due to local compaction, each unit of cement slurry works more efficiently, creating stronger bonds. This allows for the use of a smaller number of piles on a project or a reduction in pile diameter while maintaining the same bearing capacity. Furthermore, using local soil as the primary aggregate minimizes transportation costs and the environmental footprint compared to constructing piles from pure concrete.

In summary, the results obtained experimentally confirm that the optimization of drill string kinematics through step-wise compaction is an effective, resource-saving, and scientifically substantiated solution for strengthening foundations in weak soils.

Conclusions

The experimental research and physical modeling of optimized drill string kinematics in Deep Soil Mixing (DSM) have demonstrated the high efficiency of the proposed step-wise compaction method. Replacing the conventional continuous tool withdrawal with discrete reverse movement, characterized by regulated stops and dosed cement slurry injection, fundamentally addresses the core challenge of the technology – the structural heterogeneity of the formed soil-cement piles.

In the context of contemporary global research, particularly studies evaluating the impact of mixing parameters on the strength of stabilized soils (e.g., the influence of local mixing energy on unconfined compressive strength),

the proposed technology introduces a fundamentally new mechanism for transferring energy to the soil mass. While conventional DSM methods attempt to increase mixing energy through multiple tool passes or varying rotation speeds – which significantly extends operation time without guaranteeing homogeneity – the step-wise algorithm concentrates this energy locally. The mechanical-hydraulic compaction occurring under the expanding blades during stops ensures the targeted and deep penetration of the cement slurry into the soil pores. This avoids the «encapsulation effect» of clay agglomerates and forms a significantly denser contact zone compared to reference continuous mixing methods.

Quantitative results from mechanical testing strongly indicate the effectiveness of this physical process. The proposed method allows for a significant increase (up to 47%) in the compressive strength of the soil-cement compared to samples formed without targeted compaction. This substantial gain in bearing capacity was recorded across all investigated soil types – clay, loam, and sandy loam – with Portland cement dosages ranging from 10% to 20%. Furthermore, the study clearly defined the rational limits of the kinematic parameters: it was experimentally proven that the drill string stop step should be 350...400 mm of the borehole height. Exceeding this height (above 400 mm) inevitably leads to the formation of under-compacted soil layers, compromising the structural integrity, while reducing the step (below 350 mm) yields no further strength increase, making the process technologically redundant.

Beyond purely mechanical advantages, the implementation of controlled local compaction offers a pronounced resource-saving and economic effect. Enhancing the saturation and compaction of the mixture ensures an overall reduction in resource consumption by 25-35%. This is achieved by reducing the required number and length of piles needed to meet the design bearing capacity, as well as by fully utilizing the local excavated soil as the primary construction material. Ultimately, the proposed pile manufacturing method is a reliable innovative solution that comprehensively enhances the water resistance, durability, and bearing capacity of foundations, making step-wise DSM a promising technology for widespread implementation in the construction and reconstruction of facilities in challenging soil conditions.

Conflicts of interest

The authors confirm that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could influence the research, as well as the results presented in this article.

Funding

The authors confirm that the study was conducted without financial support.

Data availability

The authors confirm that all data are available in numerical or graphical form in the main text of the article.

Use of artificial intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies when creating the current work.

References

1. Mahabub, M. S., Hasan, M. R., Khatti, J., & Hossain, A. T. M. S. (2024). Assessing the effects of influencing parameters on field strength of soft coastal soil stabilized by deep mixing method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03502-y>
2. Bychevyi, P. P., & Mishuk, K. M. (2021). Sposib vyhotovlennia pal [*Method of manufacturing piles*] (Ukraine Patent No. UA 146568 U). State Enterprise «Ukrainian Intellectual Property Institute». https://web.znu.edu.ua/NIS//2021/getdocument_5_.pdf
3. Falah, M. W., & Muteb, H. (2023). Applying different soil stabilization mechanisms: a review. *Archives of Civil Engineering*, 69(4), 339-358. <https://doi.org/10.24425/ace.2023.147663>
4. Gupta, S., & Kumar, S. (2023). A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(207). <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01098-6>
5. Sharma, A. K., et al. (2021). Ground improvement using chemical methods: A review. *Heliyon*, 7(8), e07678. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07678>
6. Hung, C., Chen, C.-S., Liu, C.-H., Lin, C.-Y., Hsu, C.-Y., Wang, Y.-W., & Lin, K. A. (2024). Recent Advances in Soil Stabilization and Reinforcement: A Comprehensive Review of Emerging Technologies. *Advances in Civil Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/2303208>

Література

1. Mahabub, M. S., Hasan, M. R., Khatti, J., & Hossain, A. T. M. S. (2024). Assessing the effects of influencing parameters on field strength of soft coastal soil stabilized by deep mixing method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03502-y>
2. Бичевий П. П., Мішук К. М. (2021). Спосіб виготовлення паль (Патент України № UA 146568 U). ДП «Український інститут інтелектуальної власності». https://web.znu.edu.ua/NIS//2021/getdocument_5_.pdf
3. Falah, M. W., & Muteb, H. (2023). Applying different soil stabilization mechanisms: a review. *Archives of Civil Engineering*, 69(4), 339-358. <https://doi.org/10.24425/ace.2023.147663>
4. Gupta, S., & Kumar, S. (2023). A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(207). <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01098-6>
5. Sharma, A. K., et al. (2021). Ground improvement using chemical methods: A review. *Heliyon*, 7(8), e07678. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07678>

6. Hung, C., Chen, C.-S., Liu, C.-H., Lin, C.-Y., Hsu, C.-Y., Wang, Y.-W., & Lin, K. A. (2024). Recent Advances in Soil Stabilization and Reinforcement: A Comprehensive Review of Emerging Technologies. *Advances in Civil Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/2303208>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 05.05.2026	Received 05.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 19.05.2026	Received in revised form 19.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

І. А. Арутюнян

Доктор технічних наук, професор, завідувач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5049-3742>
Кафедра промислового та цивільного будівництва
Запорізький національний університет, проспект Соборний, 226, Запоріжжя, Україна 69000

К. М. Мішук*

Кандидат технічних наук, доцент, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5480-6032>
Кафедра промислового та цивільного будівництва
Запорізький національний університет, проспект Соборний, 226, Запоріжжя, Україна 69000

Є. Е. Арутюнян

PhD, старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0502-6651>
Кафедра міського будівництва та архітектури
Запорізький національний університет, проспект Соборний, 226, Запоріжжя, Україна 69000

*автор-кореспондент, e-mail: mishukivk@gmail.com

Підвищення міцності ґрунтоцементних паль шляхом оптимізації кінематики бурової штанги при глибинному змішуванні

Цитувати як:

Арутюнян, І. А., Мішук, К. М., Арутюнян, Є. Е. (2026). Підвищення міцності ґрунтоцементних паль шляхом оптимізації кінематики бурової штанги при глибинному змішуванні. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 284-296. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-21](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-21)

Анотація. У цьому дослідженні пропонується вдосконалений метод виготовлення ґрунтоцементних паль з використанням технології глибокого змішування ґрунтів (DSM) для підвищення несучої здатності та довговічності фундаментів у м'яких ґрунтах. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності влаштування основ і фундаментів у складних інженерно-геологічних умовах, де традиційні методи укріплення ґрунтів не завжди забезпечують належні показники міцності та однорідності масиву. У дослідженні представлено концептуальну модель локального ущільнення, яка розглядає свердловину як комбіновану механіко-гідралічну систему, що дозволяє

точніше описати процес формування ґрунтоцементного елемента та керувати його фізико-механічними властивостями.

Цей підхід інтегрує безперервне закачування цементного розчину з дискретними зворотними рухами бурильної колони кожні 350-400 мм, що забезпечує інтенсифікацію процесу перемішування та ущільнення ґрунтоцементної суміші по всій глибині свердловини. Така технологічна схема сприяє формуванню більш щільної та однорідної структури матеріалу, зменшенню пористості та підвищенню адгезійних властивостей між частинками ґрунту та цементного каменю. Лабораторні випробування на глині, суглинку та супіску (вміст цементу 10-20%) підтвердили, що ступінчасте ущільнення збільшує міцність на стиск до 47% (майже у 1,5 рази), досягаючи 12,9 МПа для глини та 15,2 МПа для супіску, що свідчить про високу ефективність запропонованої методу.

Результати досліджень показують, що крок ущільнення, що перевищує 400 мм, призводить до структурної неоднорідності та зниження експлуатаційних характеристик палів, тоді як оптимальний інтервал забезпечує максимальну щільність і рівномірний розподіл напружень у масиві. Додатково встановлено, що контроль параметрів процесу (швидкість підйому інструменту, витрата розчину, кратність реверсних переміщень) має вирішальне значення для досягнення стабільних результатів у польових умовах. Технологія зменшує споживання ресурсів на 25-35% завдяки ефективному використанню місцевих ґрунтів, зниженню витрат цементу та енергії, а також скороченню тривалості виконання робіт.

Запропонований підхід забезпечує ресурсозберігаюче та екологічно доцільне рішення для будівництва фундаментів і підпірних стін у складних геотехнічних умовах, а також має потенціал для широкого впровадження у практику цивільного та промислового будівництва. Отримані результати можуть бути використані при розробці нормативних рекомендацій та вдосконаленні технологічних регламентів виконання робіт із глибокого змішування ґрунтів.

Ключові слова: ґрунтоцементна паля, глибинне змішування ґрунтів (DSM), цементна суспензія, локальне ущільнення, кінематика бурової штанги, несуча здатність

УДК 711

В. Б. Ігнатська

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9688-4992>

Кафедра будівельної механіки

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, вул. Руська, 56, Тернопіль, Україна, 46025

e-mail: vikto-ignat@ukr.net

Веломобіль як елемент інноваційної транспортної системи міста

Цитувати як:

Ігнатська, В. Б. (2026). Веломобіль як елемент інноваційної транспортної системи міста. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 297-310. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-22)

© 2026, Автор. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Анотація. У статті наведено результати дослідження особливостей функціонування веломобіля як інноваційного транспортного засобу.

Наведено загальну характеристику веломобіля як транспортного засобу. Показано, що веломобіль є безпечним, комфортним, досить швидкісним видом транспорту, який можна використовувати у різних кліматичних умовах. Для користування ним не потрібна спеціальна і тривала підготовка. Наведено класифікацію веломобілів за функціональним призначенням. Охарактеризовано кожен клас веломобілів. Наведено порівняльний аналіз веломобілів з іншими видами міського транспорту. Проведено аналіз маси веломобіля. Зазначено, що у майбутньому, з удосконаленням конструкцій та використанням новітніх матеріалів, масу веломобілів можна буде зменшити майже вдвічі. Здійснено порівняння швидкості, витрат часу при пересуванні різними видами транспорту, витрат енергії, впливу на міське середовище, рівень шуму, вартості експлуатації, потреби в інфраструктурі, а також комфорту пересування. Показано, що веломобіль є більш екологічним, недорогим у використанні і функціональним видом транспорту. Також показано, що впровадження веломобіля у міське середовище створює можливість для раціонального використання міського простору.

Описано можливість застосування веломобілів в різних сферах життя: для щоденних поїздок, екскурсій, прогулянок, перевезення вантажів, для соціальних потреб. Ним можуть користуватись люди похилого віку, люди з інвалідністю або обмеженою рухливістю, а також ті, кому важко користуватись звичайним велосипедом.

У сукупності показано, що за умов наявності відповідної інфраструктури, а також певної підтримки з боку держави, веломобіль може стати одним із інноваційних елементів транспортної системи міста.

Ключові слова: веломобіль, інновації, транспортна система, біотранспорт, екологічний транспорт, міський транспорт, мобільність

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У світі все більш популярним стає використання екологічних і економічно вигідних транспортних засобів. Особливе місце займає біотранспорт, розвиток якого тісно пов'язаний із розвитком сучасного суспільства. Біотранспорт широко використовується в Нідерландах, Данії, Бельгії та Німеччині. Він є популярним видом транспорту у Швеції, Фінляндії, Великій Британії та Китаї. Досвід цих країн показує, що широке використання біотранспорту допомагає зменшити навантаження на дорожню інфраструктуру міста, а також знизити рівень забруднення та шуму в міському середовищі [1-7].

Питаннями розвитку біотранспорту займалися як українські, так і іноземні вчені. Зокрема, Орда О. та Голубничим Є. обґрунтовано роль велосипедної інфраструктури як основи міської мобільності [8-9]. В роботах Телепова О., Петрушенко Ю. та Біленко В., доведено, що інноваційним і екологічним видом транспорту є велосипед і потрібно розвивати велосипедну інфраструктуру в Україні [10]. Пановик П. та Лозинським Р. досліджено проблеми впровадження велотранспорту [11]. Методологічні аспекти інноваційного розвитку транспортних систем розглянуто у праці Калюжного В., що дозволяє обґрунтувати необхідність впровадження нових видів транспорту, зокрема біотранспорту [12].

Іноземними дослідниками Ву Чень, Sybil Derrible, Саймон Фрейзер, Карен Лок та іншими доведено перспективність біотранспорту та його значення для зменшення викидів [13-14]. У праці Фернанду Фонтеш та Віктор Андраде обґрунтовано ефективність використання велосипедного транспорту у міській логістиці [15].

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері біотранспорту, основна увага науковців зосереджена на велосипедах та велосипедній інфраструктурі, питання використання веломобілів як окремого виду біотранспорту майже не досліджені. Це свідчить, що є необхідність вивчення їх функціональних можливостей та ролі в інноваційній транспортній системі міста.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження особливостей функціонування веломобіля як інноваційного транспортного засобу.

Задачею даного дослідження є порівняння веломобілів з іншими видами транспорту та оцінка перспектив їх впровадження у міське середовище.

Матеріали та методи

Для аналізу літературних джерел і теоретичних положень застосовувались методи аналізу та синтезу. Розгляд веломобіля як

технічної системи проводився з застосуванням методу системного підходу. Порівняння веломобіля з іншими видами транспорту здійснювалось методом порівняльного аналізу.

Результати та обговорення

Веломобіль – транспортний засіб, який приводиться в рух мускульною силою людини. Він має стійку платформу, яка спирається на три або чотири колеса, закритий або напівзакритий кузов, покращену аеродинаміку, можливість захисту від погодних умов, зручне сидіння з ергономічною посадкою. Такі характеристики роблять його безпечним та достатньо комфортним видом транспорту, який можна використовувати у різних кліматичних умовах. Веломобіль досить швидкісний транспортний засіб. Для користування ним не потрібна спеціальна і тривала підготовка [16-17].

За функціональним призначенням веломобілі можна класифікувати на транспортні, туристичні, спортивні та спеціальні.

До класу транспортних веломобілів належать транспортні засоби з м'язовим приводом, призначені для перевезення невеликих і легких вантажів у межах міст, сіл або між ними. Основу цього класу, безсумнівно, складає веломобіль для індивідуального користування, оснащений невеликим багажником або причепом (рис. 1).



Рис. 1. Міський веломобіль [18]

Поїздки на роботу та з роботи, походи до магазинів і на ринок, фітнес- та рекреаційні прогулянки, а також просто групові виїзди – ось основні сфери використання та застосування цього виду транспорту. На даний час існує кілька іноземних компаній, що виробляють побутові

веломобілі, наприклад Quest та WoW. Технічні характеристики цих машин схожі: максимальна швидкість становить близько 50 км/год, а вага – 25-40 кг. Також доступні двомісні моделі. Окрім високої швидкості, ці веломобілі захищають водія від негоди [17].

Клас спортивних веломобілів включає шосейні та трекові моделі. Сьогодні більш поширеними є шосейні моделі (рис. 2).



Рис. 2. Спортивний веломобіль [19]

Окрему категорію становить так званий підклас «відкритих рекордсменів», у якому практично відсутні жорсткі технічні обмеження. За таких умов конструктори можуть експериментувати з формою, матеріалами та конструкцією, щоб досягти максимально можливої швидкості. Основна увага приділяється поліпшенню аеродинаміки, зменшенню ваги, підвищенню ефективності механізмів та використанню можливостей спортсмена під час руху. Такі веломобілі є експериментальними моделями: вони дають змогу випробувати нові технічні рішення, які згодом можуть бути застосовані до стандартних спортивних моделей з урахуванням встановлених обмежень, з метою створення рівних технічних можливостей кожному спортсменові в умовах одного змагання [20-21].

Туристичні веломобілі використовуються як для туризму, так і для відпочинку. Туристичний варіант веломобіля для одноденних і багатоденних поїздок оснащений спеціальними багажниками (рис. 3). Він може мати причіп і спеціальні пристосування для кріплення інструменту, запасних частин і шин. Особливе місце в цьому класі займають родинні варіанти веломобіля, розраховані на двох дорослих і малолітньої дитини, а також компактні і розбірні веломобілі і амфібії для водних подорожей [22].



Рис. 3. Туристичний веломобіль [23]

Клас спеціальних веломобілів отримав найбільший розвиток у східних країнах. Сьогодні конструктори можуть створювати спеціальні моделі веломобілів, призначені для виконання конкретних завдань. Наприклад, для доставки пошти чи газет, перевезення швидкопсувних товарів або доставки невеликих вантажів за конкретними адресами. Їх також можна використовувати для перевезення важкого багажу, наприклад на залізничних вокзалах. Крім того, з'являються можливості для створення транспортних екіпажів для використання в цехах і на території промислових підприємств [24].

Порівняння веломобіля з іншими видами міського транспорту наведено в табл. 1. Показники таблиці сформовано на основі аналізу літературних джерел [1, 2, 14, 15, 22, 27, 28], а також узагальнення технічних характеристик різних видів міського транспорту. Оцінювання виконувалось за критеріями середньої швидкості пересування в міських умовах, рівня енергоспоживання, впливу на довкілля, шумового навантаження, вартості експлуатації та потреби в інфраструктурі.

Веломобіль є легким транспортним засобом. Його маса набагато менша за масу автомобіля та залежить від конструкції. Наприклад, відкритий веломобіль із плівковим верхом може важити не більше 10 кг. Водночас, створити повністю закритий веломобіль із жорстким кузовом і невеликою масою (менше 20 кг) досить складно. Середня маса веломобіля коливається в межах 10-30 кг. У майбутньому, з удосконаленням конструкцій та використанням новітніх матеріалів, масу веломобілів можна буде зменшити майже вдвічі [25, 26].

Таблиця 1. Характеристика різних видів міського транспорту

Показник	Автомобіль	Громадський транспорт	Велосипед	Веломобіль
Середня швидкість, км/год	25-30	15-20	10-15	30-40
Витрати енергії	високі (паливо)	середні (електро/паливо)	низькі (мускульні)	дуже низькі (мускульні)
Екологічний вплив	високий	середній	відсутній	відсутній
Рівень шуму	високий	середній	низький	дуже низький
Вартість експлуатації	висока	середня	дуже низька	низька
Потреба в інфраструктурі	значна	значна	помірна	помірна
Комфорт	високий	середній	низький	високий

Швидкість міського веломобіля залежить від фізичних можливостей користувача та якості дороги. Вплив вітру є мінімальним. Висока швидкість має важливе значення для економії часу при пересуванні між різними районами міста. Друга причина бажаної високої швидкості веломобіля - підвищення пропускної спроможності велодоріжок. Якщо взяти за основу доступну для людини з середньою фізичною підготовкою потужність у 0,2 кВт, то швидкість веломобіля становитиме приблизно 40 км/год. При цьому на меншій швидкості значно скорочується необхідна потужність для руху: наприклад, для швидкості 10 км/год достатньо лише 0,03 кВт. Фізично підготовлені користувачі здатні розганяти такий транспортний засіб до 50-60 км/год [20, 27].

Переміщуючись по місту, веломобіліст тисне на педалі лише протягом 45-70 % часу поїздки. Решту часу рух забезпечує інерція. Замість звичайних гальм можна використовувати інерційний механічний акумулятор або піковий електричний прилад, який працює у режимі генератора. На рівнинній місцевості, за умов якісної організації дорожнього руху та досвіду водіння, потреба у використанні гальм мінімальна. Порівняємо швидкості і витрати часу в системі веломобільного транспорту з витратами на існуючі міські транспортні засоби. Найшвидший вид транспорту - метрополітен. Швидкість

сполучення близько 40 км/год. Автобуси та тролейбуси пересуваються, в середньому, зі швидкістю 17 км/год. Легкові автомобілі, на вулицях загальноміського та районного значення, мають швидкість до 30 км/год, а на вулицях місцевого значення вона знижується до 15-20 км/год. Однак, у міських умовах автомобілі лише 15-25 % часу їдуть із постійною швидкістю. Решту часу вони їдуть з прискоренням та за інерцією з гальмуванням [22, 27]. Таким чином, середня швидкість міського транспорту суттєво поступається автомобілям на автострадах. Виграш в часі, порівняно з пішоходами, автомобіль забезпечує лише на відстані понад 0,8 км [27]. Крім того, користування автомобілем потребує додаткових витрат часу на дорогу до гаража.

Веломобілі є надійним транспортним засобом, завдяки своїй простоті. Їхня вартість, а також вартість їх експлуатації, всього в 1,5 рази перевищують аналогічні показники для велосипедів. Відповідно до техніко-економічних розрахунків, створення системи велодоріжок збільшує витрати на будівництво і модернізацію міських доріг лише на 1,5-2 %. Термін окупності - 1,5-2 роки. Міський велотранспорт заслуговує на титул одного з найекономніших видів транспорту. Веломобіль може перевозити повсякденні вантажі вагою до 50 кг і більше, забезпечуючи доставку від дверей до дверей [22, 28].

Їзда на велосипеді не завжди забезпечує гармонійний розвиток м'язів. Веломобіль сприяє оптимізації рухів і положення тіла з точки зору біомеханіки. Досліджено, що особливо зручним є розташування керма поруч із стегнами, коли руки лежать уздовж тіла. Щоб забезпечити комфорт під час поїздки, передавальні відношення повинні бути ретельно підібрані для оптимальної частоти рухів та відповідати біохімічним потребам тіла [20, 21, 29].

У спортивних моделях веломобілів раціональнішим є використання авіаційних форм дизайну, а не автомобільних. Рекомендовано застосовувати яскраві кольори та виключити занадто великі прозорі поверхні [30].

Більшість веломобілів створюють як одномісний транспорт із можливістю перевозити дитину або невеликий багаж. Також існують модульні веломобілі. Їх можна збирати в дво-, три- або чотиримісні потяги. Такі веломобілі можна використовувати, наприклад, для сімейного відпочинку. В такому потязу кермо має лише передній веломобіль. Спортивні, туристичні чи розважальні моделі можуть бути багатомісними. Вантажні веломобілі у внутрішньозаводських умовах здатні перевозити до 1 тони вантажу на рівних дорогах зі швидкістю пішохода [1, 12, 31, 32].

Також веломобіль має значно менший вплив на дорожнє покриття, що зменшує витрати на його ремонт і обслуговування.

Таким чином, велосмобїль має великі переваги в порівнянні із громадським транспортом, автомобілем та велосипедом. Швидкість сполучення на велосмобїлі може в 2-3 рази перевищувати швидкість громадського вуличного транспорту. Велосмобїль не використовує викопне паливо, не має вихлопних газів, не вимагає складного технічного обслуговування. Він забезпечує акустичний та вібраційний комфорт, завжди готовий до поїздки. Водій і пасажери мають зручну позу при пересуванні. Конструкції велосмобїлів аеродинамічні, мають оптимальну біомеханіку, легкі, комфортні і стійкі.

Отже велосмобїль може стати найкомфортнішим та найдешевшим видом транспорту для міста.

Велосмобїль, загалом, має доволі великий потенціал для подальшого розвитку і може застосовуватися в різних сферах, не тільки як звичайний транспорт. Він може бути корисним у туристичній сфері, наприклад для прогулянок чи екскурсій. Велосмобїль можна застосовувати для перевезення вантажів. Також він підходить для соціальних потреб, наприклад ним можуть користуватися люди похилого віку, люди з інвалідністю або обмеженою рухливістю, ті, хто відновлюється після травм, а також люди, яким важко тримати рівновагу на звичайному велосипеді. У таких випадках велосмобїль зручніший, бо він стійкий (не треба балансувати) і зазвичай має комфортнішу посадку. Також велосмобїлі можуть використовуватися у зонах відпочинку, де не потрібен швидкий рух, але важлива екологічність і тиша.

Висновки

Дослідження показало, що велосмобїль має значний потенціал для використання у сучасній транспортній системі міста. Встановлено можливість застосування велосмобїлів не лише для індивідуального пересування, а й для туристичних, соціальних та вантажних потреб. Порівняння велосмобїлів з іншими видами міського транспорту дозволило визначити основні переваги велосмобїля, зокрема енергоефективність, екологічність, низький рівень шуму та можливість раціонального використання міського простору. Визначено, що перспективність впровадження велосмобїлів значною мірою залежить від розвитку відповідної інфраструктури та підтримки екологічних видів транспорту на рівні міської політики.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи він не використовував технології штучного інтелекту.

References

1. Pucher, John & Buehler, Ralph. (2007). At the frontiers of cycling: Policy innovations in the Netherlands, Denmark, and Germany. *World Transport Policy and Practice*, 13, 8-57.
2. Pucher, John, Buehler, Ralph, (2008). Cycling for Everyone: Lessons from Europe. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2074, pp 58-65, <https://doi.org/10.3141/2074-08>.
3. Kolesnikov, V. O. (2020). Vodnevi tekhnologii. Chastyna 2. Vantazhni vodnevi avtomobili. *Problemy ta perspektvy rozvytku avtomobilnoho transportu*, 12-13, <http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2020.pdf>.
4. Ihnatieva, V. (2025, December). Information support for territorial improvement planning. In *I International Scientific and Practical Conference: Planning and Ensuring Sustainable Development of Socio-Economic Systems* (No. Part 1). WSHIU University of Applied Sciences.
5. Stashkiv, M. Ya., Dziura, V. O., Romaniuk, O. B., & Chorny, T. V. (2020). Pidvyshchennia transportnoi bezpeky na neregulovanomu perekhresti z kiltsevym rukhom. *Transportna bezpeka: pravovi ta orhanizatsiini aspekty*, 248-252, <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/33027>.
6. Lorenzo Stilo, Diana Segura-Velandia, Heinz Lugo, Paul P. Conway, Andrew A. West, (2021). Electric bicycles, next generation low carbon transport systems: A survey. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Volume 10, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100347>.
7. Kolesnykov, V. A., Kotomtsev, O. Yu., & Deviatkyn, Yu. S. (2010). Perspektvy uspolzovaniya ekranoplanov, kak novoho vyda transporta, <http://hdl.handle.net/123456789/4793>.
8. Orda, O., & Holubnichii, Y. (2025). Planning of bicycle infrastructure for urban sustainable mobility: Kharkiv case study. *Transport Systems and Technologies*, (46), <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2025-46-8>.
9. Potaman, N., Orda, O., & Orda, O. (2024). Analysis of Sustainable Urban Mobility Planning Aspects in the Context of European Integration Reforms in Ukraine. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10(41(2)), 188-195, [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.188-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.188-195).
10. Teletov, O., Petrushenko Yu. & Bilenko, V. (2016). Bicycle transport as an object of ecological marketing and innovations in urban transportations. *Marketing and Management of Innovations*, 3, 283-292, <https://doi.org/10.21272/mmi.2016.3-22>.
11. Panovik, Petro & Lozynskyy, Roman. (2024). The bicycle network development problems in Ternopil, 8, 742-764, [https://doi.org/10.52058/3041-1572-2024-8\(8\)-742-764](https://doi.org/10.52058/3041-1572-2024-8(8)-742-764).
12. Kaliuzhnyi, V. V. (2014). *Prohnozuvannya v innovatsiinii diialnosti: metodolohichni ta metodychni aspekty rozvytku tekhnichnykh system*. Noulidzh.

13. Chen, W., Carstensen, T.A., Wang, R. et al. (2022). Historical patterns and sustainability implications of worldwide bicycle ownership and use. *Commun Earth Environ* 3, 171, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00497-4>.
14. Simon D.S. Fraser, Karen Lock, Cycling for transport and public health: a systematic review of the effect of the environment on cycling, *European Journal of Public Health*, Volume 21, Issue 6, December 2011, Pages 738–743, <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckq145>.
15. Fontes, F.; Andrade, V. (2022). Bicycle Logistics as a Sustainability Strategy: Lessons from Brazil and Germany. *Sustainability*, <https://doi.org/10.3390/su141912613>.
16. Kumar, Micheal & Kumar, J. Prajan & Subash, K., & Sanjay, S., & Vendhan, V., Dharani & Kumar, Adhish. (2024). Design and Implementation of Sustainable Transportation - Electrical Velomobile. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 11, 549-553, <https://doi.org/10.32628/IJSRST241161104>.
17. What is a velomobile? - *Velomobile World*. (b. d.). Velomobile World. https://www.velomobileworld.com/what-is-a-velomobile/?utm_source=chatgpt.com.
18. *No Sidebar - Arcana by HTML5 UP*. (б. д.). Leiba. http://www.leiba.de/leiba_classic.html.
19. # 3: *Milan SL MK7 (white/red)* - *Velomobil.blog*. (б. д.). Velomobil.blog. <https://velomobil.blog/en/3-milan-sl-mk7-white-red/>.
20. Alessandro Di Gesù, Chiara Gastaldi, Cristiana Delprete. (2024). Human-powered vehicles as a way to abate transport-related greenhouse gas emissions: Part 2 - A virtual prototype for emissions and performance analyses, *Transportation Engineering*, Volume 18, <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100278>.
21. Pehan, Stanislav & Kegl, Breda. (2015). Efficient Velomobile Design. *Applied Mechanics and Materials*, 806, 232-239, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.806.232>.
22. Rose, Geoffrey & Liang, Alex. (2021). Velomobiles and Urban Mobility: Opportunities and Challenges, https://doi.org/10.1007/978-3-030-65843-4_3.
23. xplorcycles GmbH & Co. KG. (2026, 8 травня). *HP Scorpion - Liegerad / Liegedreirad / Trike*. Kleinanzeigen. <https://www.kleinanzeigen.de/s-anzeige/hp-scorpion-liegerad-liegedreirad-trike/1367210966-217-1794>.
24. Vittouris, A., van Malssen, K. (Ed.), & Richardson, M. (2012). Designing for Velomobile Diversity: Alternative opportunities for sustainable personal mobility. In *7th International Velomobile Seminar Programme* (pp. 1 - 36).
25. Wilhelm, T., Dorsch, V., & Gauter, F. (2021). Mass Data Measurement, Approximation and Influence on Vehicle Stability for Ultra-Light Human-Powered Vehicles. *Applied Sciences*, 11(12), 5485. <https://doi.org/10.3390/app11125485>.
26. Vittouris, Alexander & Richardson, Mark. (2014). Designing Vehicles for Natural Production: Growing a Velomobile from Bamboo. *ATRF 2011 - 34th Australasian Transport Research Forum*.
27. Lyashuk, O., Stashkiv, M., Lytvynenko, I., Sakhno, V., Khoroshun, R. (2023). Information Technologies Use in the Study of Functional Properties of Wheeled Vehicles. In *ITTAP* (pp. 500-512), <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper29.pdf>.
28. Alessandro Di Gesù, Chiara Gastaldi, Cristiana Delprete, (2025). Human-powered vehicles as a way to abate transport-related greenhouse gas emissions, Part 1: Assessing modal shift impact through comparative Life Cycle Assessment - An Italian

case study, *Transportation Engineering*, Volume 22, <https://doi.org/10.1016/j.treng.2025.100401>.

29. Qiu, L.-Y., He, L.-Y. (2018) Bike Sharing and the Economy, the Environment, and Health-Related Externalities. *Sustainability* 2018, 10, 1145. <https://doi.org/10.3390/su10041145>.

30. Ignatieva, V. (2020). Rozvytok трудовoho potentsialu shliakhom intensyfikatsii tvorchosti. *Fundamentalni ta prykladni problemy suchasnykh tekhnolohii*, 269, https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/31838/2/FAPMT_2020_Ignatieva_V-Labor_potential_development_269.pdf.

31. Zhao, C., Carstensen, T.A., Nielsen, T.A.S., Olafsson, A.S. (2018) Bicycle-friendly infrastructure planning in Beijing and Copenhagen - between adapting design solutions and learning local planning cultures. *Journal of Transport Geography*. 2018, 68, 149-159, <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.003>.

32. Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>.

Література

1. Pucher, John & Buehler, Ralph. (2007). At the frontiers of cycling: Policy innovations in the Netherlands, Denmark, and Germany. *World Transport Policy and Practice*. 13, 8-57.

2. Pucher, John, Buehler, Ralph, (2008). Cycling for Everyone: Lessons from Europe. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2074, pp 58-65, <https://doi.org/10.3141/2074-08>.

3. Колесніков, В. О. (2020). Водневі технології. Частина 2. Вантажні водневі автомобілі. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту*, 12-13, <http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2020.pdf/>.

4. Ihnatieva, V. (2025, December). Information support for territorial improvement planning. In *I International Scientific and Practical Conference: Planning and Ensuring Sustainable Development of Socio-Economic Systems* (No. Part 1). WSHIU University of Applied Sciences.

5. Сташків, М. Я., Дзюра, В. О., Романюк, О. Б., & Чорний, Т. В. (2020). Підвищення транспортної безпеки на нерегульованому перехресті з кільцевим рухом. *Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти*, 248-252, <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/33027>.

6. Lorenzo Stilo, Diana Segura-Velandia, Heinz Lugo, Paul P. Conway, Andrew A. West, (2021). Electric bicycles, next generation low carbon transport systems: A survey. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Volume 10, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100347>.

7. Колесніков, В. А., Котомцев, О. Ю., & Девяткин, Ю. С. (2010). *Перспективи использования экранопланов, как нового вида транспорта*, <http://hdl.handle.net/123456789/4793>.

8. Orda, O., & Holubnichii, Y. (2025). Planning of bicycle infrastructure for urban sustainable mobility: Kharkiv case study. *Transport Systems and Technologies*, (46), <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2025-46-8>.

9. Potaman, N., Orda, O., & Orda, O. (2024). Analysis of Sustainable Urban Mobility Planning Aspects in the Context of European Integration Reforms in Ukraine.

Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, 10(41(2)), 188-195, [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.188-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.188-195).

10. Teletov, O., Petrushenko Yu. & Bilenko, V. (2016). Bicycle transport as an object of ecological marketing and innovations in urban transportations. *Marketing and Management of Innovations*, 3, 283-292, <https://doi.org/10.21272/mmi.2016.3-22>.

11. Panovyk, P. & Lozynskyy, R. (2024). The bicycle network development problems in Ternopil. 8, 742–764, [https://doi.org/10.52058/3041-1572-2024-8\(8\)-742-764](https://doi.org/10.52058/3041-1572-2024-8(8)-742-764).

12. Калюжний, В. В. (2014). *Прогнозування в інноваційній діяльності: методологічні та методичні аспекти розвитку технічних систем*. Ноулідж.

13. Chen, W., Carstensen, T.A., Wang, R. et al. (2022). Historical patterns and sustainability implications of worldwide bicycle ownership and use. *Commun Earth Environ* 3, 171, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00497-4>.

14. Simon D.S. Fraser, Karen Lock, Cycling for transport and public health: a systematic review of the effect of the environment on cycling, *European Journal of Public Health*, Volume 21, Issue 6, December 2011, Pages 738–743, <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckq145>.

15. Fontes, F.; Andrade, V. (2022). Bicycle Logistics as a Sustainability Strategy: Lessons from Brazil and Germany. *Sustainability*, <https://doi.org/10.3390/su141912613>.

16. Kumar, Micheal & Kumar, J. Prajan & Subash, K. & Sanjay, S. & Vendhan, V. Dharani & Kumar, Adhish. (2024). Design and Implementation of Sustainable Transportation - Electrical Velomobile. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 11, 549-553, <https://doi.org/10.32628/IJSRST241161104>.

17. What is a velomobile? - *Velomobile World*. (б. д.). Velomobile World. https://www.velomobileworld.com/what-is-a-velomobile/?utm_source=chatgpt.com.

18. *No Sidebar - Arcana by HTML5 UP*. (б. д.). Leiba. http://www.leiba.de/leiba_classic.html.

19. # 3: *Milan SL MK7 (white/red) - Velomobil.blog*. (б. д.). Velomobil.blog. <https://velomobil.blog/en/3-milan-sl-mk7-white-red/>.

20. Alessandro Di Gesù, Chiara Gastaldi, Cristiana Delprete. (2024). Human-powered vehicles as a way to abate transport-related greenhouse gas emissions: Part 2 - A virtual prototype for emissions and performance analyses, *Transportation Engineering*, Volume 18, <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100278>.

21. Pehan, Stanislav & Kegl, Breda. (2015). Efficient Velomobile Design. *Applied Mechanics and Materials*, 806, 232-239, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.806.232>.

22. Rose, Geoffrey & Liang, Alex. (2021). Velomobiles and Urban Mobility: Opportunities and Challenges, https://doi.org/10.1007/978-3-030-65843-4_3.

23. xplorcycles GmbH & Co. KG. (2026, 8 травня). *HP Scorpion - Liegerad / Liegedreirad / Trike*. Kleinanzeigen. <https://www.kleinanzeigen.de/s-anzeige/hp-scorpion-liegerad-liegedreirad-trike/1367210966-217-1794>.

24. Vittouris, A., van Malssen, K. (Ed.), & Richardson, M. (2012). Designing for Velomobile Diversity: Alternative opportunities for sustainable personal mobility. *In 7th International Velomobile Seminar Programme* (pp. 1 - 36).

25. Wilhelm, T., Dorsch, V., & Gauterin, F. (2021). Mass Data Measurement, Approximation and Influence on Vehicle Stability for Ultra-Light Human-Powered Vehicles. *Applied Sciences*, 11(12), 5485. <https://doi.org/10.3390/app11125485>.

26. Vittouris, Alexander & Richardson, Mark. (2014). Designing Vehicles for Natural Production: Growing a Velomobile from Bamboo. *ATRF 2011 - 34th Australasian Transport Research Forum*.

27. Lyashuk, O., Stashkiv, M., Lytvynenko, I., Sakhno, V., Khoroshun, R. (2023). Information Technologies Use in the Study of Functional Properties of Wheeled Vehicles. In *ITTAP* (pp. 500-512), <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper29.pdf>.

28. Alessandro Di Gesù, Chiara Gastaldi, Cristiana Delprete, (2025). Human-powered vehicles as a way to abate transport-related greenhouse gas emissions, Part 1: Assessing modal shift impact through comparative Life Cycle Assessment - An Italian case study, *Transportation Engineering*, Volume 22, <https://doi.org/10.1016/j.treng.2025.100401>.

29. Qiu, L.-Y., He, L.-Y. (2018) Bike Sharing and the Economy, the Environment, and Health-Related Externalities. *Sustainability* 2018, 10, 1145. <https://doi.org/10.3390/su10041145>.

30. Ignatieva, V. (2020). Розвиток трудового потенціалу шляхом інтенсифікації творчості. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій*, 269, https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/31838/2/FAPMT_2020_Ignatieva_V-Labor_potential_development_269.pdf.

31. Zhao, C., Carstensen, T.A., Nielsen, T.A.S., Olafsson, A.S. (2018) Bicycle-friendly infrastructure planning in Beijing and Copenhagen - between adapting design solutions and learning local planning cultures. *Journal of Transport Geography*. 2018, 68, 149–159, <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.003>.

32. Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 08.05.2026	Received 08.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 15.05.2026	Received in revised form 15.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

V. B. Ihnatieva

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9688-4992>
Department of Structural Mechanics
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ruska St., 56, Ternopil, Ukraine, 46025

e-mail: vikto-igna@ukr.net

The velomobile as part of an innovative urban transport system

How to Cite:

Ihnatieva, V. B. (2026). The velomobile as part of an innovative urban transport system. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 297-310. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-22)

Abstract. The article presents the results of a study into the characteristics of the velomobile as an innovative mode of transport.

A general description of the velomobile as a means of transport is provided. It is shown that the velomobile is a safe, comfortable and reasonably fast mode of transport that can be used in various climatic conditions. No special or lengthy training is required to use it. A classification of velomobiles by functional purpose is provided. Each class of velomobile is described. A comparative analysis of velomobiles with other modes of urban transport is carried out. An analysis of the weight of the velomobile is conducted. It is noted that in the future, with improvements in design and the use of the latest materials, the weight of velomobiles could be reduced by almost half. A comparison is made of speed, travel time for different modes of transport, energy consumption, impact on the urban environment, noise levels, operating costs, infrastructure requirements, and travel comfort. It has been shown that the velomobile is a more environmentally friendly, cost-effective and functional mode of transport. It has also been shown that the introduction of the velomobile into the urban environment creates opportunities for the rational use of urban space.

The potential uses of velomobiles in various areas of life are described: for everyday journeys, excursions, leisure rides, goods transport, and to meet social needs. They can be used by older people, people with disabilities or reduced mobility, and those who find it difficult to ride a conventional bicycle.

Overall, it is shown that, with the appropriate infrastructure and a certain level of state support, the velomobile could become one of the innovative elements of a city's transport system.

Keywords: velomobile, innovation, transport system, eco-friendly transport, sustainable transport, urban transport, mobility.

УДК 624.012.45

Т.Н. Азізов

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9621-9805>

Кафедра Залізобетонних конструкцій та транспортних споруд
Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

Кафедра Будівельних конструкцій

Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, Суми, Україна, 40021

О.Ф. Майстренко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2941-4149>

Кафедра Залізобетонних конструкцій та транспортних споруд
Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

М.С. Балакан

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0330-2954>

Кафедра Залізобетонних конструкцій та транспортних споруд
Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

*автор-кореспондент, e-mail: mavstrenkoof@gmail.com

До розрахунку збірно-монолітних тонкостінних залізобетонних склепінь, що виготовляються без застосування опалубки

Цитувати як:

Азізов, Т.Н., Майстренко, О.Ф., Балакан М.С. (2026). До розрахунку збірно-монолітних тонкостінних залізобетонних склепінь, що виготовляються без застосування опалубки. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 311-325. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-23](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-23)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розглянуто питання розрахунку збірно-монолітних тонкостінних залізобетонних склепінь, що виготовляються без застосування опалубки. Такі конструкції поєднують у собі переваги просторових покриттів та індустріальних збірних елементів; вони можуть виготовлятися безпосередньо на будівельному майданчику з використанням простих технологічних прийомів формування криволінійної поверхні. Разом з тим методика розрахунку подібних конструкцій, зокрема перевірка міцності монолітних швів між збірними елементами, у науковій літературі практично відсутня.

Результати розрахунків показали, що зміна жорсткості монолітного шва практично не впливає на величину внутрішніх зусиль у конструкції і лише незначно позначається на переміщеннях. Це дозволяє при розрахунку використовувати спрощену стрижневу модель арки без явного моделювання монолітних швів. Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні закономірностей

розподілу зусиль у комбінованих аркових системах з урахуванням варіативності фізико-механічних характеристик матеріалу швів. Доведено, що локальна неоднорідність жорсткості в зонах стикування елементів не спричиняє суттєвого перерозподілу моментів та сил, що обґрунтовує коректність застосування методів опору матеріалів для аналізу складних просторових оболонок даного типу.

Запропоновано підхід до перевірки міцності швів на зсув відповідно до положень Єврокоду-2 з урахуванням реальних значень поперечних сил, отриманих із розрахунку конструкції. Виконано розрахунки арок зі стрілою підйому 3 м та прольотами від 6 до 18 м, визначено необхідне армування та несучу здатність монолітних швів. Розроблена інженерна методика дозволяє на етапі проектування оперативно оцінювати надійність контактних швів, спираючись на стандартні вихідні дані програмних комплексів загального призначення.

Отримані результати продемонстрували значний запас міцності контактних поверхонь при зсуві навіть без урахування додаткового ефекту стискальних напружень у шві. Це свідчить про можливість ефективного використання тонкостінних збірно-монолітних склепінь для перекриття прольотів середньої величини, забезпечуючи при цьому високу економічну ефективність за рахунок відсутності витрат на складну опалубку.

Ключові слова: залізобетонне склепіння, арка, монолітний шов, несуча здатність, міцність на зсув, поперечна сила.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

Тонкостінні просторові покриття мають низку переваг порівняно з покриттями з плоских конструкцій [1, 3, 9-11]. На виготовлення просторових конструкцій витрачається на 25–40% менше матеріалів [5, 10, 11]. Однак їх зведення пов'язане зі значними складнощами при монтажі збірних елементів, великою витратою металу на закладні деталі [6, 9, 11, 14] або високою вартістю опалубки при виготовленні монолітних варіантів.

Товщина монолітних оболонок навіть невеликого прольоту повинна прийматися не менше 60 мм з умов забезпечення якісного бетонування на майданчику [5, 7, 9], хоча за умови лише міцності для малих прольотів цілком достатньою могла б бути товщина 40-80 мм. Таким чином, попри явні переваги просторових конструкцій, складність їх виготовлення та монтажу обмежує їх застосування та призводить до подорожчання.

У роботі автора [8] запропоновано конструкцію збірно-монолітного склепіння, що поєднує переваги просторових систем із технологічністю виготовлення та монтажу. Проте загальноприйнята методика розрахунку таких конструкцій наразі відсутня. У статті [2] наведено підхід до розрахунку збірно-монолітного склепіння як стрижневої арки, але не виконано числовий аналіз цієї методики. Крім того, не встановлено

особливості розрахунку міцності нормальних перерізів у місцях швів порівняно з основним бетоном.

Слід зазначити, що при застосуванні збірно-монолітних систем виникає ряд специфічних питань. На відміну від традиційних монолітних оболонки, вони містять ділянки бетону, що укладається в різний час [9, 11, 12]. Це призводить до утворення контактних поверхонь, роботу яких при зсуві необхідно перевіряти окремо. Існуючі нормативні методики, зокрема положення Єврокоду-2 [4], дозволяють виконувати таку перевірку, однак для розглянутого типу конструкцій відсутній аналіз реальних величин зусиль у швах та їхнього впливу на загальну роботу системи.

Крім того, при використанні сучасних програмних комплексів постає питання: чи необхідно враховувати зміну жорсткості монолітних швів при моделюванні, чи допустимо розглядати конструкцію як умовно однорідну систему? У зв'язку з цим виникає необхідність виконання числового аналізу роботи збірно-монолітного склепіння та оцінки впливу жорсткості швів на його напружено-деформований стан (НДС).

Наукова новизна роботи полягає у встановленні впливу жорсткості монолітних швів на НДС тонкостінного збірно-монолітного склепіння та в обґрунтуванні інженерного підходу до перевірки міцності швів на зсув на основі зусиль, отриманих із розрахунку спрощеної стрижневої моделі. Показано, що зміна модуля пружності бетону шва в широких межах практично не впливає на внутрішні зусилля, що дозволяє суттєво спростити розрахункову модель.

Метою роботи є розробка інженерної методики розрахунку міцності нормальних перерізів і контактних швів у збірно-монолітних склепіннях. Для цього виконано числовий аналіз роботи аркової системи, що моделює смугу склепіння, із використанням ПК Ліра-САПР. Досліджено вплив жорсткості монолітного шва на НДС конструкції при варіюванні модуля пружності бетону шва в межах від 0,5 до 1,5 від модуля пружності основних елементів.

Матеріали та методи

У роботі [8] розглянуто метод виготовлення збірно-монолітного залізобетонного склепіння без використання складної опалубки. Таке склепіння може виготовлятися як у заводських умовах, так і безпосередньо на будівельному майданчику. Загальний вигляд склепіння на етапі перед бетонуванням монолітних ділянок наведено на рис. 1.

При симетричному навантаженні на склепіння вздовж його довжини (тобто у напрямку, перпендикулярному площині рис. 1) розрахункову схему можна представити у вигляді арки одиничної ширини з ділянками, жорсткість яких змінюється за довжиною прольоту.

Для аналізу впливу класу бетону проведено розрахунки варіантів такої арки шириною 0.5 м в програмному комплексі Ліра-САПР на рівномірне навантаження на горизонтальну проекцію (рис. 2) та на навантаження, коли власна вага прикладена по всьому прольоту, а тимчасове навантаження – на половині прольоту. При цьому в стрижневій моделі за рис. 2 приймалися окремі елементи, що моделюють роботу збірних елементів, і окремі скінченні елементи, що моделюють роботу монолітних швів.

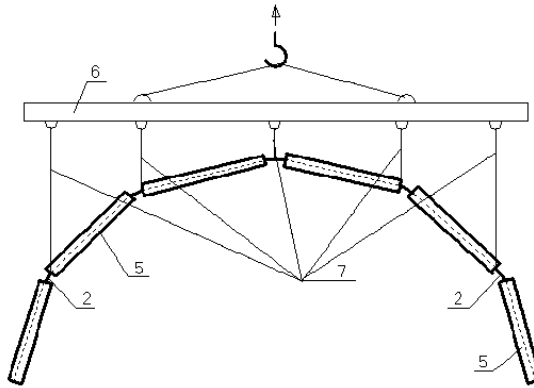


Рис. 1. Схема формування залізобетонного склепіння методом підвішування [8]

В розрахунках варіювався модуль пружності бетону монолітних швів E_{sh} в межах $(0.5 \div 1.5) \cdot E$, де E – модуль пружності основних елементів. В таблиці 1 наведені дані щодо максимальних значень зусиль і переміщень для всіх варіантів.

Для оцінки напружено-деформованого стану конструкції склепіння було розглянуто як арку постійної ширини, що дорівнює ширині смуги конструкції. Такий підхід є коректним при симетричному навантаженні по довжині склепіння, коли робота конструкції у поперечному напрямку практично не впливає на розподіл зусиль уздовж арки.

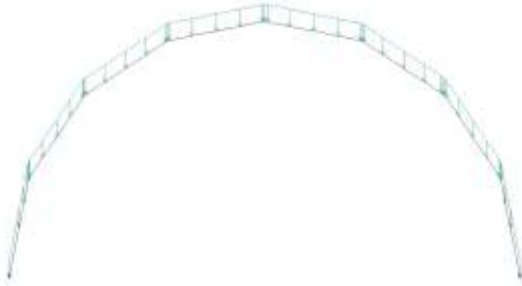


Рис. 2. Розрахункова схема арки в програмному комплексі Ліра-САПР

Параметри розрахункової схеми (див. рис. 2) наступні: арка має прольот L та стрілу підйому f . Навантаження прикладалося до горизонтальної проекції арки у вигляді рівномірно розподіленого навантаження, що відповідає сумі власної ваги конструкції та тимчасового навантаження. Розрахунок виконано у програмному комплексі Ліра-САПР із використанням стрижневих скінченних елементів. Монолітні шви моделювалися ділянками з іншим модулем пружності бетону E_{sh} . Для аналізу впливу жорсткості швів модуль пружності бетону в цих ділянках змінювався в межах $E_{sh}=(0.5\div 1.5)E$, де E – модуль пружності бетону основних елементів.

Результати та обговорення

Основними результатами розрахунку були максимальні значення згинальних моментів M , поздовжніх сил N , поперечних сил Q , переміщень конструкції.

Таблиця 1. Максимальні переміщення і зусилля в склепінні в залежності від характеристик монолітного шва

Показник	$E_{sh}=E/2$	$E_{sh}=0.75E$	$E_{sh}=E$	$E_{sh}=1.25E$	$E_{sh}=1.5E$
Мах переміщення (мм)	12	11.5	11.3	11.2	11.1
Мах згинальний момент (кН·м)	1.2581	1.2598	1.2606	1.2612	1.2615
Мах поперечна сила (кН)	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
Мах поздовжня сила (кН)	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8

Дані таблиці 1 свідчать про те, що зміна модуля пружності шва по відношенню до модуля пружності основної частини не впливає на зусилля і мало впливає на максимальні переміщення. Так, зменшення модуля пружності шва в два рази збільшує максимальний прогин в 1.06 раза, а збільшення в 1.5 раза зменшує максимальний прогин в 1.08 раза.

Малий вплив модуля пружності бетону шва грає на користь збірно-монолітної конструкції. Це означає, що пред'являти жорсткі умови до монолітного шва з точки зору визначення переміщень і зусиль в елементах такої системи не треба. З іншого боку клас бетону грає роль в забезпеченні міцності стику між основними елементами склепіння. Тому треба було перевірити, який саме розрахунок буде грати вирішальну роль в розрахунку такої конструкції: перевірка міцності на згинальні моменти і поздовжню силу чи перевірка на зсув на контакті збірних елементів з монолітним бетоном. Розглянемо саме цей аспект окремо.

В п. 6.2.5 Єврокоду-2 [4] записана умова по напруженнях зсуву на контакті між бетоном, укладеним в різний час:

$$V_{Edi} \leq V_{Rdi} \quad (1)$$

де V_{Edi} – розрахункова величина напружень зсуву на контакті:

$$V_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i) \quad (2)$$

де β – це відношення поздовжньої сили в новій бетонній ділянці та загальної поздовжньої сили в зоні стиснення або розтягу, обидві розраховані для розглянутого перерізу. Але в нашому випадку V_{Edi} – це поперечна сила Q , отримана із розрахунку (див. вище), поділена на площу контакту між старим і новим бетоном:

$$V_{Edi} = Q / (b \cdot h) \quad (3)$$

де b , h – відповідно ширина панелі і висота поперечного перерізу (товщина склепіння). Тобто V_{Edi} – це зсувні напруження в шві між основним бетоном і монолітною ділянкою.

В формулі (1) V_{Rdi} – розрахунковий опір зсуву на контакті, який визначається за формулою:

$$V_{Rdi} = c \cdot f_{cd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (4)$$

де коефіцієнт v враховує, що бетон у зсувному напруженому стані руйнується раніше, ніж при чистому стисненні і визначається за формулою (6.6N) Єврокоду-2 [4].

Враховуючи, що кут α – це кут, під яким арматура перетинає поверхню контакту, він буде мати значення 90° і формула (4) набуде вигляду:

$$V_{Rdi} = c \cdot f_{cd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot \mu \leq 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (5)$$

Коефіцієнт ρ враховує вплив арматури на роботу при зрізі і в нашому випадку дорівнює:

$$\rho = A_s / (b \cdot h) \quad (6)$$

де b , h – те ж саме, що і в формулі (3).

Враховуючи, що в нашому випадку поверхня контакту між старим і новим бетоном сформована опалубкою, то за п. 6.2.5 [4] коефіцієнти c та μ , які враховують шорсткість поверхні слід прийняти рівними $c=0.35$; $\mu=0.6$.

Розглянемо тепер визначення напружень σ_n , що є напруженнями, які враховують силу тертя. У Єврокодї-2 [4] не визначено чітко, яку саме площу контакту слід враховувати, проте зазначено, що силу тертя допускається враховувати лише за умови відсутності розтягувальних напружень на поверхні контакту. У зв'язку з цим запропоновано методикою визначення еквівалентних напружень.

При відомих значеннях M , N в кожному шві ми за методикою норм [12, 13] можемо визначити висоту стиснутої зони бетону і напруженні в цій зоні на будь якій стадії роботи конструкції. Далі, прийнявши умовно трикутний розподіл напружень в стиснутій зоні (йде в запас міцності по напруженням стиску, що відповідають за врахування тертя) визначити зусилля стиску N_c :

$$N_c = \frac{\sigma_{\max} x}{2} b \quad (7)$$

де σ_{\max} – максимальні напруження трикутної епюри.

Еквівалентні напруження будуть визначатися за виразом:

$$\sigma_{n,eff} = \frac{N_c}{b \cdot h} \quad (8)$$

Підставляючи замість σ_n в формулу (5) значення σ_n , і знаючи значення ρ за (6), а також значення $c=0.35$; $\mu=0.6$ і характеристики бетону та арматури, перевірку міцності шва між старим і новим бетоном слід вважати завершеною.

Враховуючи дані таблиці 1 про малий вплив жорсткості монолітного шва на величину зусиль в елементах арки, розглянемо декілька варіантів частини склепіння по її довжині (арок) шириною 500 мм з точку зору попереднього підбору арматури і перевірки міцності монолітного шва на зсув. Для цього розглянуто п'ять варіантів арок зі стрілою підйому 3 м, прольотом 6, 9, 12, 15 та 18 метрів. Кожна арка була розрахована на два варіанти навантаження: повне завантаження власною вагою та снігом; завантаження половини арки снігом. З двох варіантів навантаження обрані найбільші зусилля: максимальний момент M_{\max} і відповідна поздовжня сила $N_{\text{відпов}}$ для цього елемента (для розрахунку міцності шва на зріз), а також максимальне значення поздовжньої сили N_{\max} і поперечної сили Q_{\max} . Зважаючи на специфіку виготовлення арок (див. рис. 1), армування всіх арок прийнято одиночне в середині товщини

арки. В таблиці 2 наведені дані цих розрахунків. При цьому власна вага була визначена в залежності від товщини арки і її ширини (500 мм), навантаження від снігу прийнято 1.5 КПа.

На основі результатів розрахунків у програмному комплексі Ліра-САПР, залежно від значень максимальних згинальних моментів, було підібрано армування з урахуванням його розташування по центру (в середині) товщини арки. Крок поздовжніх стрижнів арматури по ширині склепіння (арки) прийнятий 100 мм. Також було визначено необхідну товщину арки з умови, щоб відносна висота стиснутої зони бетону не перевищувала граничне значення 0.45, що регламентується Єврокодом-2 [4].

Таблиця 2. Максимальні значення зусиль для арок висотою 3 м з різними прольотами

Проліт арки (м)	M_{\max} (кН·м)	$N_{\text{відпов}}$ (кН)	N_{\max} (кН)	Q_{\max} (кН)
L=6	1.26	4.46	4.8	1.56
L=9	1.51	5.0	8.26	1.61
L=12	2.33	7.52	12.6	1.88
L=15	3.34	11.32	17.91	2.39
L=18	4.68	16.0	24.3	2.90

З огляду на симетричне (центральне) розташування арматури за товщиною перерізу, робоча висота перерізу d прийнята рівною половині його повної товщини h . У таблиці 3 наведено результати цих розрахунків та перевірку несучої здатності.

Таблиця 3. Несуча здатність перерізів на згин з прийнятим армуванням

Проліт арки, (м)	M_{\max} (кН·м)	Діаметр арматури (мм)	Крок вздовж склепіння (мм)	Висота перерізу, h (мм)	Робоча висота перерізу, d (мм)	Загальна площа арматури $A_{s,\text{tot}}$ (см ²)	Несуча здатність перерізу, [М] (кН·м)	Відношення [М] / М
6	1.26	6	100	60	30	1.414	1.58	1.26
9	1.51	6	100	60	30	1.414	1.58	1.05

12	2.33	8	100	60	30	2.513	2.46	1.05
15	3.39	10	100	80	40	3.927	4.82	1.42
18	4.69	10	100	100	50	3.927	6.53	1.39

Для надійної експлуатації запропонованого збірно-монолітного склепіння слід розрахувати несучу здатність монолітних швів на зсув відносно збірних елементів. З цією метою було проведено розрахунки їхньої несучої здатності за наведеною вище методикою. У таблиці 4 наведено дані щодо несучої здатності монолітних швів на зсув. Зважаючи на значний запас міцності, у цій таблиці під час обчислення значення V_{Rdi} не враховувалася дія стискальних напружень.

Слід зазначити, що незважаючи на те, що товщина арки (склепіння) менша за товщину монолітних склепінь, її несуча здатність, в тому числі монолітних швів є цілком достатньою, що є аргументом на користь використання таких склепінь.

Таблиця 4. Несуча здатність монолітного шву на зсув

Проліт арки (м)	Коефіцієнт ρ	V_{Rdi} (МПа)		Q_{max} (кН)	V_{Edi} (МПа)	V_{Rdi} / V_{Edi}
		ліва частина	права частина			
6	0.00471	6.3	3.84	1.56	0.052	73.9
9	0.00471	6.3	3.84	1.61	0.054	71.6
12	0.00838	7.26	3.84	1.88	0.063	61.3
15	0.00981	7.64	3.84	2.39	0.059	64.3
18	0.00785	7.12	3.84	2.90	0.058	66.2

Отримані результати дозволяють зробити ряд важливих висновків щодо роботи збірно-монолітного склепіння, що виготовляється без застосування опалубки.

Насамперед слід відзначити, що жорсткість монолітного шва практично не впливає на величину внутрішніх зусиль у конструкції. Як показано у таблиці 1, навіть при зміні модуля пружності бетону шва в широких межах $E_{sh}=(0.5\div 1.5)E$ величини згинального моменту, поперечної та поздовжньої сил залишаються практично незмінними. Це пояснюється тим, що шви займають відносно невелику частину довжини склепіння і тому їх локальна деформативність практично не впливає на глобальну жорсткість системи.

Найбільш чутливою характеристикою до зміни жорсткості шва виявились переміщення. Однак навіть у цьому випадку зміна максимального прогину не перевищує декількох відсотків. Так, при зменшенні модуля пружності шва в два рази прогин збільшується лише приблизно на 6%. З інженерної точки зору така різниця є несуттєвою.

Це означає, що при попередньому розрахунку таких конструкцій можна приймати однакові характеристики матеріалу для всієї арки, не моделюючи окремо ділянки монолітних швів. Такий підхід значно спрощує розрахунок, особливо при використанні стрижневих розрахункових схем.

Отримані результати дозволяють сформулювати важливий практичний висновок. Оскільки поперечна сила Q практично не залежить від жорсткості шва, при розрахунку склепіння в програмних комплексах типу Ліра-САПР немає необхідності моделювати кожний монолітний шов окремим елементом з власними характеристиками жорсткості (як це зроблено в схемі за рис. 1).

З інженерної точки зору достатньо використовувати спрощену модель, у якій вся конструкція розглядається як однорідна арка. При цьому внутрішні зусилля M , N та Q визначаються для такої спрощеної системи, а перевірка міцності швів виконується вже на основі отриманих зусиль.

Такий підхід має декілька важливих переваг: суттєво спрощується розрахункова схема; зменшується кількість елементів у моделі; зменшується час підготовки розрахунку; підвищується наочність результатів. При цьому точність визначення зусиль практично не знижується, що підтверджується результатами числового аналізу.

У таблицях 2-4 наведені результати розрахунків арок з однаковою стрілою підйому $f=3$ м та різними прольотами L . Таким чином відношення L/f змінюється в межах $L/f=2\div 6$. Цей діапазон відповідає більшості практичних випадків застосування пологих арочних покриттів.

Аналіз таблиці 2 показує, що зі збільшенням прольоту арки закономірно зростають згинальні моменти, поздовжні сили, поперечні сили. Проте навіть для найбільшого розглянутого прольоту $L=18$ м значення поперечної сили залишається відносно невеликим. Це пояснюється тим, що основна частина навантаження в арці передається через поздовжні сили стиску. У той же час при збільшенні відношення L/f арка стає більш пологою, що призводить до поступового збільшення згинальних моментів та саме вони визначають необхідну кількість арматури в перерізі.

Особливу увагу в даній роботі приділено перевірці міцності монолітного шва на зсув. Це пояснюється тим, що при виготовленні конструкції бетон у швах укладається пізніше, ніж бетон основних

елементів. Згідно з положеннями Єврокоду-2 [4], опір зсуву на контакті між бетоном, укладеним у різний час, залежить від шорсткості поверхні, наявності арматури, нормальних стискаючих напружень. У проведених розрахунках враховано тільки перші два фактори. Стискаючі напруження, які виникають у швах внаслідок роботи арки, не враховувались. Таким чином отримані результати фактично відповідають консервативному випадку. Як видно з таблиці 4, відношення V_{Rdi}/V_{Edi} значно перевищує одиницю і знаходиться в межах приблизно від 60 до 74. Такий великий запас пояснюється двома причинами: це відносно невеликими поперечні сили в арці; значна площа контакту між старим та новим бетоном. Якщо додатково врахувати стискаючі напруження, що виникають у шві, опір зсуву буде ще більшим.

Таким чином, можна зробити висновок, що для розглянутих геометричних параметрів конструкції міцність шва на зсув не є визначальним фактором.

На основі виконаних досліджень можна сформулювати ряд практичних рекомендацій для проектування таких конструкцій.

1. При розрахунку склепіння допускається використовувати спрощену стрижневу модель без виділення окремих елементів, що відповідають монолітним швам.

2. Основна увага при проектуванні повинна приділятися перевірці міцності нормальних перерізів арки.

3. Перевірка міцності швів на зсув повинна виконуватись відповідно до положень Єврокоду-2, однак у більшості практичних випадків запас міцності буде значним.

4. Навіть при відносно невеликій товщині склепіння (60–100 мм) несуча здатність конструкції виявляється достатньою для перекриття прольотів до 18 м (для розглянутих у роботі геометрії стріли підйому $f = 3m$ та ширини смуги 500 мм). Це свідчить про високу ефективність тонкостінних елементів у порівнянні з традиційними монолітними арочними склепіннями, однак для інших варіантів навантажень та геометричних пропорцій потрібна додаткова перевірка.

5. Для підвищення надійності конструкції доцільно забезпечувати достатню шорсткість поверхні збірних елементів перед бетонуванням швів.

Висновки

Проведений числовий аналіз показав, що зміна модуля пружності бетону монолітного шва в межах $E_{sh}=(0.5\div 1.5)E$ практично не впливає на величину внутрішніх зусиль у збірно-монолітному склепінні. Максимальні переміщення конструкції змінюються незначно і відрізняються не більше

ніж на декілька відсотків. Результати дослідження підтверджують доцільність використання тонкостінних збірно-монолітних склепінь, що виготовляються без застосування опалубки, для перекриття прольотів середньої величини (зокрема, до 18 м за відповідних геометричних параметрів). Запропонована спрощена методика інженерного розрахунку є справедливою для конструкцій, що працюють в умовах переважно симетричного розподіленого навантаження (до 1,5 кПа) та стандартних співвідношень стріли підйому до прольоту. Подальше розширення меж застосування розробленого підходу для більших навантажень або інших геометрич склепінь потребує додаткових параметричних досліджень.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., Williams, C. (2014). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge, 320. <https://doi.org/10.4324/9781315849270>.
2. Azizov, T., Azizova, A., Al Ghadban, S. (2018). Construction and calculation of reinforced concrete overlap with a high spatial work effect. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7 (3), 567–574. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14591>.
3. Billington, D. P. (1982). *Thin Shell Concrete Structures*. McGraw-Hill, 320.
4. EN 1992-1-1:2004. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization, 225.
5. MacGregor, J. G., Wight, J. K. (2012). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design* (6th ed.). Pearson Education, 1176.
6. Mosley, W. H., Bungey, J. H., Hulse, R. (2012). *Reinforced Concrete Design to Eurocode 2* (7th ed.). Palgrave Macmillan, 448. <https://doi.org/10.1007/978-1-137-01749-9>.

7. Nilson, A. H., Darwin, D., Dolan, C. (2010). *Design of Concrete Structures* (14th ed.). McGraw-Hill, 768.
8. Azizov, T. N. (2010). *Sposib vyhotovlennia prostorovoi zbirno-monolitnoi konstruksii* [Method of manufacturing a spatial precast-monolithic structure]. Patent for utility model No. 54246 Ukraine. Bulletin No. 20.
9. Babaiev, V. M., Pluhin, A. A., Pluhin, O. A. (2012). *Zalізobetonni konstruksii: navchalnyi posibnyk* [Reinforced concrete structures: a textbook]. KhNUBA, 1–496.
10. Bazhenov, V. A., Pohorelov, V. M. (2010). *Teoriia tonkykh obolonok i plastyn* [Theory of thin shells and plates]. KNUBA, 350.
11. Barashykov, A. Ya. (1995). *Rozrakhunok i konstruiuvannia zalізobetonnykh konstruksii* [Calculation and design of reinforced concrete structures]. Vyshcha Shkola, 432.
12. DBN V.2.6-98:2009. (2011). *Betonni ta zalізobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia* [Concrete and reinforced concrete structures. General provisions]. Ministry of Regional Development of Ukraine, 71.
13. DSTU B V.2.6-156:2010. (2011). *Betonni ta zalізobetonni konstruksii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia* [Concrete and reinforced concrete structures made of heavy-weight concrete. Design rules]. Ministry of Regional Development of Ukraine, 123.
14. Azizov, T., Jurkowska, N., & Kochkarev, D. (2019). Basis of calculation on torsion for reinforced concrete structures with normal cracks. *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete Innovations in Materials, Design and Structures*, 1718–1725. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22566-7_193.

Література

1. Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., Williams, C. (2014). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge, 320. <https://doi.org/10.4324/9781315849270>.
2. Azizov, T., Azizova, A., Al Ghadban, S. (2018). Construction and calculation of reinforced concrete overlap with a high spatial work effect. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7 (3), 567–574. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14591>.
3. Billington, D. P. (1982). *Thin Shell Concrete Structures*. McGraw-Hill, 320.
4. EN 1992-1-1:2004. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization, 225.
5. MacGregor, J. G., Wight, J. K. (2012). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design* (6th ed.). Pearson Education, 1176.
6. Mosley, W. H., Bungey, J. H., Hulse, R. (2012). *Reinforced Concrete Design to Eurocode 2* (7th ed.). Palgrave Macmillan, 448. <https://doi.org/10.1007/978-1-137-01749-9>.
7. Nilson, A. H., Darwin, D., Dolan, C. (2010). *Design of Concrete Structures* (14th ed.). McGraw-Hill, 768.
8. Азізов, Т. Н. (2010). *Спосіб виготовлення просторової збірно-монолітної конструкції*. Патент на корисну модель № 54246 Україна. Бюлетень № 20.

9. Бабасєв, В. М., Плугін, А. А., Плугін, О. А. (2012). *Залізобетонні конструкції: навчальний посібник*. ХНУБА, 496.
10. Баженов, В. А., Погорєлов, В. М. (2010). *Теорія тонких оболонок і пластин*. КНУБА, 350.
11. Барашиков, А. Я. (1995). *Розрахунок і конструювання залізобетонних конструкцій*. Вища школа, 432.
12. ДБН В.2.6-98:2009. (2011). *Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення*. Мінрегіонбуд України, 71.
13. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. (2011). *Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування*. Мінрегіонбуд України, 123.
14. Azizov, T., Jurkowska, N., & Kochkarev, D. (2019). Basis of calculation on torsion for reinforced concrete structures with normal cracks. *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete Innovations in Materials, Design and Structures*, 1718–1725. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22566-7_193.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.05.2026	Received 12.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 17.05.2026	Received in revised form 17.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

T.N. Azizov

Doctor of Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9621-9805>

Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrichson St., 4, Odesa, Ukraine, 65029

Department of Structural Engineering,

Sumy National Agrarian University, Herasym Kondratiev St., 160, Sumy, Ukraine, 40021

O.F. Maistrenko*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2941-4149>

Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrichson St., 4, Odesa, Ukraine, 65029

M.S. Balakan

Ph.D. Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0330-2954>

Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrichson St., 4, Odesa, Ukraine, 65029

*corresponding author, e-mail: maystrenkoof@gmail.com

Calculation of precast-monolithic thin-walled reinforced concrete vaults manufactured without the use of formwork

How to Cite:

Azizov, T.N., Maistrenko, O.F., Balakan M.S. (2026). Calculation of precast-monolithic thin-walled reinforced concrete vaults manufactured without the use of formwork. *Modern technologies and*

Abstract. The article deals with the issue of calculating precast-monolithic thin-walled reinforced concrete vaults manufactured without the use of formwork. Such structures combine the advantages of spatial coverings and industrial precast elements; they can be fabricated directly on the construction site using simple technological techniques for forming a curved surface. At the same time, the methodology for calculating such structures, in particular, the verification of the strength of monolithic joints between precast elements, is practically absent in the scientific literature.

The calculation results showed that the change in the stiffness of the monolithic joint has practically no effect on the magnitude of internal forces in the structure and only slightly affects the displacements. This allows for the use of a simplified bar model of the arch without explicit modeling of monolithic joints during calculations. The scientific novelty of the obtained results lies in establishing the patterns of force distribution in arched systems, taking into account the variability of the physical and mechanical characteristics of the joint material. It is proved that the local heterogeneity of stiffness in the zones of element joining does not cause a significant redistribution of moments and forces, which justifies the correctness of applying strength of materials methods for the analysis of complex spatial shells of this type.

An approach for verifying the shear strength of joints in accordance with the provisions of Eurocode 2, taking into account the actual values of shear forces obtained from the structural analysis, is proposed. Calculations of arches with a rise of 3 m and spans from 6 to 18 m were performed, and the required reinforcement and load-bearing capacity of monolithic joints were determined. The developed engineering methodology allows at the design stage to promptly assess the reliability of contact joints, relying on standard output data from general-purpose software packages.

The results obtained demonstrated a significant margin of safety for the contact surfaces in shear, even without taking into account the additional effect of compressive stresses in the joint. This indicates the possibility of effective use of thin-walled precast-monolithic vaults for covering medium-sized spans, while ensuring high economic efficiency due to the absence of costs for complex formwork.

Keywords: reinforced concrete vault, arch, monolithic joint, load-bearing capacity, shear strength, shear force.

УДК 624.21

О. М. Лукін*

к.ф.-м.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9169-2950>

Кафедра мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

Д. О. Лукін

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9630-1085>

Кафедра мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: lukin.ptp@gmail.com

Статичні випробування автодорожніх мостів. ДСТУ 9280:2024 – новий підхід

Цитувати як:

Лукін, О. М., Лукін, Д. О. (2026). Статичні випробування автодорожніх мостів. ДСТУ 9280:2024 – новий підхід. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 326-337. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-24](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-24)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. На автомобільних дорогах України використовується близько 19,5 тис. мостових споруд (мости, шляхопроводи, естакади) різних років побудови. Близько 35% з них працює вже 60 і більше років [1]. На жаль, 9102 мостових споруд [1] знаходиться у експлуатаційних станах 4 та 5 (обмежено працездатному та непрацездатному), і з кожним роком ситуація погіршується. Одним з основних чинників погіршення стану споруд є їх погане утримання.

Експлуатаційне утримання є найдовшим і, мабуть, найвідповідальнішим етапом «життя» автодорожніх мостових споруд. Якщо проектування та будівництво мосту триває від місяців до декількох років, то подальша експлуатація споруди триває десятиліттями.

Одним з елементів експлуатаційного утримання мостів є їх випробування, яке також може бути окремою роботою, наприклад при прийманні споруди в експлуатацію. Випробування можуть бути статичними та динамічними. Найчастіше виконуються статичні випробування мостів, як більш прості по застосуванню обладнання та обробці результатів, які отримано при випробуванні, хоча динамічні випробування є більш інформативними.

В даному дослідженні порівнюється чинний з 01.10.2024 р. нормативний документ ДСТУ 9280:2024 [2] по статичному випробуванню автодорожніх мостів зі скасованими нормами. Підкреслюється різниця у підході до виконання статичних випробувань мостів, особливо на стадії камеральних робіт. Методологія випробування за [2] є наближеною до виконання випробувань за Єврокодами та нормами США. Аналізується необхідне тимчасове навантаження

при статичному випробуванні, застосування відповідних коефіцієнтів. Фіксуються проблемні аспекти, що виникають під час застосування нормативу [2]. Також, підкреслюється необхідність моніторингу температури мосту до початку та під час випробувань, а також урахування впливу температурних деформацій конструкції споруди на результати вимірювань.

Ключові слова: експлуатаційне утримання, мостові споруди, нормативи, статичні випробування, температурні впливи, тимчасове навантаження.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Мостові споруди є одним з найважливіших елементів транспортної інфраструктури всіх країн, Україна не є виключенням. Згідно [1], на початок 2025 р. на автомобільних дорогах України налічує 5770 мостів на дорогах державного значення, 10013 – на дорогах місцевого значення та 3663 – на вулицях населених пунктів. Мостів багато і вони потребують постійної уваги та догляду.

Згідно [6], при утриманні автодорожніх мостів виконуються наступні роботи: постійний догляд, постійний нагляд, постійний та періодичний огляди, діагностика та обстеження. За потреби може виконуватись випробування.

Усі перераховані етапи важливі, але більшість з них хоч і повинні виконуватись систематично є візуальними і не є точними. При обстеженні споруди виконується геодезична зйомка, випробовується міцність бетону елементів руйнівними або неруйнівними методами, проводяться заміри геометрії споруди та її елементів, можливо виконання інших інструментальних робіт. Але найточніше про стан мосту, зокрема про його вантажопідйомність, можна дізнатися тільки після виконання випробування споруди. Також, випробування може виконуватись окремо, наприклад, перед введенням мосту в експлуатацію.

Виконанню, аналізу та вдосконаленню методів статичного випробування присвячено дуже багато наукових робіт як в Україні, так і за кордоном, наприклад [7-12].

Згідно діючих в Україні нормативних документів по обстеженню та випробуванню автодорожніх мостів [13,14] випробування бувають статичними та динамічними. Найчастіше виконуються статичні випробування мостів, як більш прості по застосуванню обладнання та обробці результатів, які отримано при випробуванні. В новому документі [2] змінилася сама концепція статичних випробувань, особливо в частині обробки результатів.

З появою нормативного документу по виконанню статичних випробувань автодорожніх мостів [2] змінено методологію проведення

таких випробувань. Порівнюючи скасовані [3-5] та нові норми [2] можна зрозуміти різницю, суть змін, переваги нової концепції. За методологічними підходами нормативний документ [2] наближений до європейських та американських нормативів і враховує новітні зміни, що відбулися протягом останніх 20 років у сфері випробування автодорожніх мостів.

Мета і завдання дослідження. Основною метою дослідження є порівняння старих (відмінених) нормативних документів [3-5] по статичному випробуванню мостових споруд та нового ДСТУ [2]. Також проводиться аналіз його використання при виконанні випробувань.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1) описати історію нормативних документів зі статичного випробування автодорожніх мостів України;

2) виконати порівняння вимог до тимчасових навантажень різних нормативних документів, якими необхідно завантажувати автодорожній міст при його випробуванні;

3) порівняти методики обробки результатів статичних випробувань останнього відміненого нормативу [5] та нового [2];

4) звернути увагу на деякі складнощі при виконанні статичних випробувань автодорожніх мостів та врахування температурного режиму елементів мосту.

Матеріали та методи

У роботі розглядаються різні нормативні документи зі статичного випробування мостових споруд [2-5]. Дані та методи випробування порівнюються, як в частині підготовки до випробування та його безпосереднього виконання, так і при камеральній обробці.

Результати та обговорення

За роки незалежності України нормативи по обстеженню та випробуванню автодорожніх мостів змінилися декілька разів. Спочатку інженерам доводилося використовувати радянський норматив 1986 року [3], який протримався до 2002 р.

Новий норматив – [4] мав таку ж саму концепцію, як і документ [3], який заміняв. Різниця була невеликою. Обидва документи [3, 4] були написані російською мовою.

Ще з меншою різницею відносно попереднього нормативу [4] по обстеженню та випробуванню вийшов документ [5], який майже повністю копіював [4], але був написаний українською.

З 01.10.2024 р. в Україні введений в дію нормативний документ [2], який регламентує виконання статичних випробувань автодорожніх мостів.

Цей норматив замінив документ [5] і відрізняється від попередніх [3-5] іншою концепцією. Пройшло майже півтора роки використання [2] і можна зробити деякий аналіз і порівняння з попередніми нормами [3-5] (останні, скасовані, норми [5] використовувались 15 років).

В чинному ДСТУ [2] запроваджено чотири типи випробувань: приймальне, контрольне, експрес-випробування та дослідні випробування.

Приймальне випробування виконується після реконструкції або нового будівництва.

Контрольне випробування виконується на спорудах, що експлуатуються для визначення їх характеристик (наприклад, вантажопідйомності) та моніторингу технічного стану.

Експрес-випробування «виконують для визначення вантажопідйомності споруди у вигляді допустимої маси транспортного засобу в колоні» [2]. Його результати дійсні лише 1 рік і проводиться експрес-випробування можуть тільки для розрізних балкових/плитних мостів поза межами населених пунктів.

Мета дослідних випробувань – науково-дослідні роботи.

Всі нормативи по випробуванню автодорожніх мостів (і скасовані [3-5], і діючі [2, 13, 14]) вимагають, щоб перед випробуванням було виконано обстеження споруди, написано та погоджено програму випробування, було визначено вагу навантажувального обладнання (частіше, це автомашини).

Окремо варто відзначити, що в настанові [2] приділено увагу впливу температури на напружено-деформований стан мосту під час випробувань. Якщо в попередніх нормах це питання або не розглядалося [4], або рекомендувалося уникати проведення випробувань у несприятливих погодних умовах і захищати прилади від впливу кліматичних факторів [3], або враховувати лише температуру конструкцій мосту [5], то в новому нормативі [2] прямо зазначено необхідність моніторингу температури мосту до початку та під час випробувань, а також урахування впливу температурних деформацій конструкцій споруди на результати вимірювань. Крім того, наведено рекомендації щодо кліматичних умов проведення випробувань. На практиці не завжди можливо дотримуватися цих рекомендацій або очікувати сприятливих погодних умов. Під час планування випробувань доцільно враховувати прогноз погоди на відповідний день і час. Такий підхід часто недооцінюється, однак дослідження показують [15-18], що добові коливання температури повітря та перепади температури в перерізі елементів прогонової будови мосту можуть спричинити додаткові напруження і деформації, що може мати вагомий вплив на загальний напружено-деформований стан конструкції і, як наслідок, на результати випробування мосту.

Цікаво порівняти вимоги до тимчасових навантажень різних нормативних документів, якими необхідно завантажувати автодорожній міст при його випробуванні. В таблицях 1 та 2 наведено таке порівняння.

Таблиця 1. Вимоги до навантажень за відмінними нормативними документами [3-5]

№	Параметри	Будівельні норми і правила [3]	ДБН В.2.3-6-2002 [4]	СОУ 45.2-00018112-044:2009 [5]
<i>А. Зусилля в елементах від випробувального навантаження не повинні бути більшими ніж:</i>				
1.	Споруди, що розраховані по граничним станам (після 1962 р.)	Зусилля від тимчасового вертикального навантаження, що прийняті в проєкті		
	Коефіцієнт надійності по навантаженню (γ)	1	0,95	
	Динамічний коефіцієнт ($1+\mu$)	Застосовується		
	Коефіцієнт смуги	Відсутній		
2.	Споруди, що розраховані по допустимим напруженням (до 1962 р.)	120% зусиль від тимчасового вертикального навантаження, що прийняті в проєкті	110% зусиль від тимчасового вертикального навантаження, що прийняті в проєкті	
	Динамічний коефіцієнт ($1+\mu$)	Застосовується		
3.	Споруди, на які немає технічної документації або мають елементи з пониженою несучою здатністю (дефекти)	Відповідно розрахунковій вантажопідйомності споруди	За п.п.1, 2 по діючим нормам з урахуванням стану	
<i>В. Зусилля в елементах від випробувального навантаження не повинні бути нижчими ніж:</i>				
1.	Для всіх споруд	70% з п. А*	65% з п. А* 50% при обкатці	65% з п. А*

* - мається на увазі пункт А цієї ж таблиці.

Таблиця 2. Вимоги до навантажень за діючим нормативним документом [2]

ДСТУ 9280:2024 [2]			
№	Параметри	Приймальне випробування	Контрольне випробування
1.	<i>Нові споруди та споруди після реконструкції</i>		
	Навантаження	85-100 % зусиль від проектних тимчасових навантажень	65-100% розрахункових зусиль за фактичною вантажопідйомністю
	Коефіцієнт надійності по навантаженню (γ)	Відсутній	
	Динамічний коефіцієнт ($1+\mu$)	Застосовується	
	Коефіцієнт смуги	Застосовується	
2.	<i>Споруди після капітального ремонту</i>		
	Навантаження	Зусилля, які спричиняє завантаження за схемою Н-40	65-100% розрахункових зусиль за фактичною вантажопідйомністю
	Коефіцієнт надійності по навантаженню (γ)	1,1	Відсутній
	Динамічний коефіцієнт ($1+\mu$)	Застосовується	
	Коефіцієнт смуги	Відсутній	Застосовується

В усіх випадках зусилля в елементах мосту під час випробувань не повинні перевищувати максимальні проектні показники зусиль [2].

Навантаження при експрес-випробуванні повинні бути такими, щоб зусилля в елементах були на 30% більшими зусиль від навантажень Н-40 або Н-30 (для мостів з вантажопідйомністю менше 25 т) [2].

Мінімальний термін утримання навантаження, яким випробується мостова споруда, в [2] зменшений до 10 хвилин. У попередньому нормативі [5] мінімальний термін був 15 хвилин.

Аналізуючи дані з таблиць видно, що методика завантаження автодорожніх мостів за діючим нормативним документом [2] та за попередніми нормативами [3-5] має відмінності.

Є в діючих документах [2, 13, 14] і розбіжності. Наприклад, обов'язковому випробуванню підлягають нові мости з прогоновими будовами довжиною:

- згідно [13, 14] – 100 м і більше;
- згідно [2] – 36 м і більше.

При випробуванні мостових споруд дуже важливими є етапи камеральних робіт – підготовка до випробування та обробка даних випробування. На цих етапах різниця в підході та методологія скасованих нормативів [3-5] та діючого [2] є найбільшою.

Так в [3-5] для підтвердження «позитивної оцінки роботи конструкції мостів» вираховуються коефіцієнти:

- конструктивний коефіцієнт – відношення виміряного при випробуванні фактору (частіше, прогини балок) до того ж фактору визначеного розрахунком [5];
- коефіцієнт α – який рахується, як співвідношення виміряних та пружних деформацій (також, частіше, прогини) [5].

Згідно діючих норм [2] перед випробуванням (обов'язково після виконання обстеження мосту) потрібно створити розрахункову модель споруди із застосуванням методу скінчених елементів, на якій змодельовати випробування. Цей розрахунок є основою для написання програми випробування.

Після виконання натурного випробування мосту дані, що отримали, порівнюють з даними попереднього розрахунку. Якщо дані напружено-деформованого стану не співпадають – розрахункову модель коригують. Тобто, є чітка умова: розрахункові дані повинні відповідати експериментальним (випробувальним). Підкреслюється, що «у висновках за результатами випробувань слід зазначати результати порівняння фактичних і розрахункових показників» [2].

Є розбіжності в нормах [2] та [5] в оцінці залишкових деформацій елементів. У [5] для цього вираховувався коефіцієнт α , який для нових мостів повинен був бути не більше 0,15, а для споруд, що експлуатуються – не більше 0,05. За діючим нормативом [2] максимальні залишкові деформації не повинні перевищувати 10% для нових споруд та 5% для споруд, що експлуатуються.

Однак, при застосуванні методики статичного випробування за [2] бувають складнощі:

- часто проєктні розрахунки виконавцю випробування недоступні навіть при випробуванні нових мостів;

- при випробуванні мостів, що експлуатуються, дуже часто повністю відсутня проєктна документація (частіше, орієнтуються по року будівництва споруди);

- щоб виконати попередній розрахунок потрібно чітко знати тимчасове навантаження, яке надає замовник (будівельна організація на прохання замовника). Часто дані по випробувальному навантаженню надаються дуже пізно і важко встигнути виконати серйозні попередні розрахунки (з точним урахуванням конкретного наданого автотранспорту);

- на сьогодні згідно з [6] при капітальному ремонті можна міняти визначальні елементи (тобто, прогонові будови, опори та фундаменти). Цим часто користуються замовники і під титулом «Капітальний ремонт» будують новий міст. Не дуже зрозуміло яке буде випробування приймальне (як для нового будівництва) чи контрольне (як для капітального ремонту).

Додаткові труднощі під час виконання випробувань створюють й інші чинники, зокрема на автомобільних дорогах із високою інтенсивністю руху. Так, бували випадки під час випробувань, коли по мосту проїжджала колона вантажівок з важливим вантажем і частину робіт по випробуванню споруди треба було переробляти.

Висновки

З введенням нормативного документу ДСТУ 9280:2024 обробка та процедура прийняття рішення про позитивні результати статичних випробувань автодорожніх мостів стає дещо складнішою. Потрібно виконувати більше розрахунків. В той же час, теоретичні результати стають більш достовірними та обґрунтованими, що дає можливість якісніше виконати статичні випробування автодорожніх мостових споруд. Методологія випробування за ДСТУ 9280:2024 є наближеною до виконання випробувань за Єврокодами та нормами США. Є і деякі складнощі, враховуючи українські реалії.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Zagreba V. Bridges in Ukraine: Crisis, Challenges and Way Forward. Policy paper. A comprehensive review of Ukraine's and the public policies that govern planning, design, construction and maintenance of bridges in Ukraine. 2025. 58 p.
2. DSTU 9280:2024. Nastanova shchodo provedennia statychnykh vyprobuvan avtodorozhnykh mostiv (State Standard of Ukraine (DSTU 9280:2024) Guidelines for Conducting Static Testing of Highway Bridges). DP «UkrNDNTs», Kyiv, 2024. 23 p.
3. SNyP 3.06.07-86. Mosty i truby. Pravya obstezhennia ta vyprobuвання (Construction Norms and Rules (SNyP 3.06.07-86) Bridges and Culverts. Requirements for Inspection and Testing). Derzhbud SRSR, 40 p.
4. DBN V.2.3-6-2002. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuвання (State Building Norms (DBN V.2.3-6-2002) Bridges and Culverts. Inspection and Testing). Derzhbud Ukrainy, Kyiv, 2002. 29 p.
5. SOU 45.2-00018112-044:2009. Sporudy transportu. Statychni vyprobuвання avtodorozhnykh mostiv (Organization Standard of Ukraine (SOU 45.2-00018112-044:2009) Transport Structures. Static Testing of Highway Bridges). DP «DerzhdorNDI», Kyiv, 2009. 11 p.
6. DSTU 8989:2020. Nastanova z utrymannia avtodorozhnykh mostiv (State Standard of Ukraine (DSTU 8989:2020) Guidelines for the Maintenance of Highway Bridges). DP «UkrNDNTs», Kyiv, 2021. 42 p.
7. Onyshchenko A.M., Zavorodnii S.S. Modern Approaches to In-Situ Bridge Testing in the Experience of Ukraine and World Practice. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. Kyiv, 2025. Vol. 3. pp. 26-37. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2025-3-284-26-37>.
8. Ke Tu, Yingying Ye, Daqing Wu, Yunyong Zhou, Wenming Deng. Technical Analysis of Highway Bridge Static Load Test. *Journal of Architectural Research and Development*, 2023. Volume 7, Issue 3. pp. 58-63. <https://doi.org/10.26689/jard.v7i3.4829>.
9. Ihor Babyak. Features of the application of regulatory and technical documents regarding inspection and testing of bridges and pipes in Ukraine. *Dorogi i mosti*. Kyiv, 2024. Issue 29. p. 215–224. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.215>.
10. Savino, P., Tondolo, F., Sabia, D., Quattrone, A., Biondini, F., Rosati, G., et al. Large-scale experimental static testing on 50-year-old prestressed concrete bridge girders. *Applied Sciences*, 2023 Vol. 13(2). p. 834. <https://doi.org/10.3390/app13020834>.
11. Alampalli, S., Frangopol, D. M., Grimson, J., Halling, M. W., Kosnik, D. E., Lantsoght, E. O., et al. Bridge load testing: State-of-the-practice. *Journal of Bridge*.

Engineering, 2021. Vol. 3 p. 03120002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001678).

12. Zhao, J., Liu, T., Wang, Y. Static Test Analysis of a Bridge Structure in Civil Engineering. *Systems Engineering Procedia*, 2011. Vol. 1. pp. 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.08.003>.

13. DSTU 9123:2021. Nاستanova z obstezhennia ta vyprobuvannia mostiv i trub (State Standard of Ukraine (DSTU 9123:2021) Guidelines for the Inspection and Testing of Bridges and Culverts). DP «UkrNDNTs», Kyiv, 2022. 40 p.

14. DBN V.2.3-6-2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia ta vyprobuvannia (State Building Norms (DBN V.2.3-6-2009) Transport Structures. Bridges and Culverts. Inspection and Testing). Minrehiobud Ukrainy, Kyiv, 2009. 42 p.

15. Lukin D., Bezbabicheva O., Lukin O. Thermal stress calculation in concrete bridge girders. *In AIP Conference Proceedings*, 2025. Vol. 3428, No. 1, p. 020033. <https://doi.org/10.1063/12.0038623>.

16. Ma, Z., Liu, Y., Liu, J., & Lyu, Y. Mitigation of thermal effects in bridges: A comprehensive review of control methodologies. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2025. Vol. 12(2). p. 215-235. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.12.003>.

17. D. Lukin. Modeling daily temperature effects on a concrete bridge in the ukrainian climate conditions. *Dorogi i mosti*. Kyiv, 2025. Issue 32. pp. 283–301. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.32.283>.

18. Luchko Y. Y., Kovalchuk V. V. Vyznachennia temperaturnykh napruzhen ta deformatsii u metalevykh prohonovykh budovakh mostiv (Determination of Thermal Stresses and Deformations in Steel Bridge Superstructures). *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*. 2013. Issue. № 4. pp. 26-36. <https://doi.org/10.15802/btrp2013/26629>.

Література

1. Загребя В. Мости в Україні: криза, проблеми, рішення. Аналітичний звіт (Policy Paper). Аналітичний огляд стану мостового господарства України й аналіз державної політики України щодо планування, проектування, будівництва та експлуатаційного утримання мостів. 2025. 58 с.

2. ДСТУ 9280:2024. Настанова щодо проведення статичних випробувань автодорожніх мостів. ДП «УкрНДНЦ», Київ, 2024. 23 с.

3. СНиП 3.06.07-86. Мости і труби. Правила обстеження та випробування. Держбуд СРСР, 1984. 40 с.

4. ДБН В.2.3-6-2002. Мости та труби. Обстеження і випробування. Держбуд України, Київ, 2002. 29 с.

5. СОУ 45.2-00018112-044:2009. Споруди транспорту. Статичні випробування автодорожніх мостів. ДП «ДерждорНДЦ», Київ, 2009. 11 с.

6. ДСТУ 8989:2020. Настанова з утримання автодорожніх мостів. ДП «УкрНДНЦ», Київ, 2021. 42 с.

7. Онищенко А.М., Завгородній С.С. Сучасні підходи до натурних випробувань мостів. Досвід України та світова практика. *Автошляховик України*. Київ, 2025. Вип. №3. С.26-37. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2025-3-284-26-37>.

8. Ke Tu, Yingying Ye, Daqing Wu, Yunyong Zhou, Wenming Deng. Technical Analysis of Highway Bridge Static Load Test. *Journal of Architectural Research and Development*, 2023. Volume 7, Issue 3. P. 58-63. <https://doi.org/10.26689/jard.v7i3.4829>.

9. Бабяк І. П. Особливості застосування нормативно-технічних документів щодо обстеження та випробування мостів і труб в Україні. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 29. с. 215–224. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.215>.

10. Savino, P., Tondolo, F., Sabia, D., Quattrone, A., Biondini, F., Rosati, G., et al. Large-scale experimental static testing on 50-year-old prestressed concrete bridge girders. *Applied Sciences*, 2023 Vol. 13(2). p. 834. <https://doi.org/10.3390/app13020834>.

11. Alampalli, S., Frangopol, D. M., Grimson, J., Halling, M. W., Kosnik, D. E., Lantsoght, E. O., et al. Bridge load testing: State-of-the-practice. *Journal of Bridge Engineering*, 2021. Vol. 3 p. 03120002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001678).

12. Zhao, J., Liu, T., Wang, Y. Static Test Analysis of a Bridge Structure in Civil Engineering. *Systems Engineering Procedia*, 2011. Vol. 1. p. 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.08.003>.

13. ДСТУ 9123:2021. Настанова з обстеження та випробування мостів і труб. ДП «УкрНДНЦ», Київ, 2022. 40 с.

14. ДБН В.2.3-6-2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження та випробування. Мінрегіонбуд України, Київ, 2009. 42 с.

15. Lukin D., Bezbabicheva O., Lukin O. Thermal stress calculation in concrete bridge girders. *In AIP Conference Proceedings*, 2025. Vol. 3428, No. 1, p. 020033. <https://doi.org/10.1063/12.0038623>.

16. Ma, Z., Liu, Y., Liu, J., & Lyu, Y. Mitigation of thermal effects in bridges: A comprehensive review of control methodologies. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2025. Vol. 12(2). p. 215-235. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.12.003>.

17. Лукін Д. О. Моделивання впливу добових температурних коливань на залізобетонний міст в умовах клімату України. *Дороги і мости*. Київ, 2025. Вип. 32. С. 283-301. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.32.283>.

18. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Визначення температурних напружень та деформацій у металевих прогонових будовах мостів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2013. № 4. С. 26-36. <https://doi.org/10.15802/bttrp2013/26629>.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.05.2026	Received 12.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 14.05.2026	Received in revised form 14.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. M. Lukin*

Cand. Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9169-2950>
Department of Bridges, Structures and Construction Mechanics named after V.O. Rosiiskoho
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudroho St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

D. O. Lukin

Ph.D. student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9630-1085>

Department of Bridges, Structures and Construction Mechanics named after V.O. Rosiiskoho Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudroho St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail: lukin.ptp@gmail.com

Static Testing of Highway Bridges. DSTU 9280:2024 – A New Approach

How to Cite:

Lukin, O. M., Lukin, D. O. (2026). Static Testing of Highway Bridges. DSTU 9280:2024 – A New Approach. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 326-337. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-24](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-24)

Abstract. Approximately 19.5 thousand bridge structures (bridges, overpasses, and viaducts) of various periods of construction are in service on the public road network of Ukraine. About 35% of them have been in operation for 60 or more years [1]. Unfortunately, 9,102 bridge structures [1] are currently classified as condition states 4 and 5 (limited serviceability and non-serviceability), and this situation continues to worsen each year. One of the main reasons for the deterioration of bridge conditions is insufficient maintenance.

Maintenance represents the longest and arguably the most critical stage in the life cycle of highway bridge structures. While the design and construction of a bridge may take from several months to a few years, its subsequent service life extends over decades.

One of the elements of bridge maintenance is structural testing, which may also be carried out as a separate activity, for example, at the commissioning stage. Bridge testing can be static or dynamic. Static load testing is most commonly performed due to its relative simplicity in terms of equipment requirements and data processing, although dynamic testing is generally more informative.

This study compares the current standard DSTU 9280:2024 [2], effective from 01.10.2024, for static testing of highway bridges with the previously cancelled standards [3–5]. Differences in approaches to static bridge testing are highlighted, particularly in the stage of data processing and analysis. The methodology introduced in [2] is shown to be closer to the testing approaches used in European and U.S. standards. The required temporary loading for static testing and the application of relevant load factors are analyzed. Problematic aspects arising in the application of DSTU 9280:2024 [2] are identified. The necessity of monitoring bridge temperature before and during testing is also emphasized, as well as accounting for the influence of temperature-induced structural deformations on measurement results.

Keywords: bridge maintenance, bridge structures, standards, static testing, temperature effects, temporary loading.

УДК 624.012.035/625.07

Ю. Ю. Зятюк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3831-6599>

Кафедра автомобільних доріг, основ та фундаментів

Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, Рівне, Україна, 33028

О. М. Поліщук

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5700-8679>

Кафедра автомобільних доріг, основ та фундаментів

Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, Рівне, Україна, 33028

*автор-кореспондент, e-mail: y.y.ziatiuk@nuwm.edu.ua

Ефективність застосування фібрового армування та модифікуючих добавок у бетоні для жорсткого дорожнього одягу

Цитувати як:

Зятюк Ю.Ю., Поліщук О.М. (2026). Ефективність застосування фібрового армування та модифікуючих добавок у бетоні для жорсткого дорожнього одягу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 338-349. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-25](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-25)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті наведено результати експериментального дослідження механічних властивостей фіробетону з використанням різних видів дисперсного армування, зокрема сталеві, поліпропіленові, скляної та базальтової фібри. Метою дослідження є оцінка впливу типу та вмісту волокон на міцність бетону при стиску, осьовому розтягу та згині, а також на тріщиностійкість і деформативність матеріалу. Основними перевагами фіробетону є зменшення трудомісткості арматурних робіт, підвищення експлуатаційної надійності конструкцій та поєднання процесів армування, приготування і укладання бетонної суміші.

Експериментальна програма передбачала випробування бетонних зразків кубів на стиск, призм на осьовий розтяг та призм на згин. Дослідження виконано із застосуванням методів математичного планування експерименту, що забезпечило скорочення кількості випробувань і високу достовірність отриманих результатів. Установлено, що введення фібри підвищує міцність, пластичність та тріщиностійкість бетону, причому характер впливу залежить від фізико-механічних властивостей волокон.

Сталева фібра забезпечує найбільше зростання міцності при розтягу та згині завдяки високому модулю пружності й здатності ефективно сприймати розтягуювальні напруження. Поліпропіленова фібра покращує тріщиностійкість, знижує усадочне тріщиноутворення та підвищує стійкість бетону до дії

агресивного середовища. Скляна фібра сприяє збільшенню міцності при згині та підвищує довговічність матеріалу завдяки високій корозійній стійкості та добрій адгезії до цементного каменю.

Отримані результати підтверджують ефективність використання різних видів фібри для підвищення механічних характеристик бетону та обґрунтовують доцільність застосування фібробетону в дорожньому будівництві, транспортних спорудах та інших конструкціях, що працюють в умовах інтенсивних навантажень, експлуатації та несприятливого впливу навколишнього середовища.

Ключові слова: фібробетон, автомобільні дороги, аеродромне покриттях, фібра, міцність, тиск.

Вступ

Сучасний розвиток транспортної інфраструктури зумовлює підвищені вимоги до надійності та довговічності жорстких дорожніх одягів, які працюють в умовах інтенсивних навантажень, кліматичних впливів і агресивних середовищ [1].

У зв'язку з цим значна увага приділяється дисперсному армуванню бетону шляхом введення фібри різної природи – сталевोї, полімерної, базальтової і скляної. Такі добавки ефективно стримують розвиток мікротріщин, підвищують тріщиностійкість, ударну в'язкість і довговічність бетону. Водночас їх ефективність залежить від типу волокон, геометричних параметрів, дозування та умов експлуатації [2].

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання комплексної оцінки ефективності різних видів фібрового армування у жорстких дорожніх одягах потребує подальшого вивчення [3]. Особливо це стосується впливу фібри на поведінку бетону під дією реальних транспортних навантажень і в агресивних середовищах.

Сталева анкерна фібра характеризується найвищими показниками міцності на розтяг (понад 600 МПа) та високим модулем пружності (приблизно 200 ГПа і більше), що наближається до показників сталі як конструкційного матеріалу [4]. Завдяки анкерній формі забезпечується ефективне механічне зчеплення з цементною матрицею, що суттєво підвищує несучу здатність бетону після утворення тріщин. Така фібра найбільш ефективна на стадії розвитку макротріщин і забезпечує значне зростання залишкової міцності та ударної в'язкості.

Поліпропіленова фібра MicroArm характеризується низькою густиною (0,91 г/см³), високою хімічною інертністю та термопластичними властивостями [5]. Модуль пружності (близько 4,9 ГПа) є суттєво нижчим порівняно з мінеральними та металевими волокнами, однак її основна функція полягає не у підвищенні міцності, а у контролі раннього мікротріщиноутворення. Завдяки рівномірному розподілу в об'ємі бетону

поліпропіленова фібра ефективно зменшує пластичну усадку та запобігає формуванню початкових дефектів структури.

Базальтова фібра Technobasalt займає проміжне положення між полімерними та сталевими волокнами [6]. Вона має високий модуль пружності (не менше 75 ГПа), добру термічну стабільність та підвищену хімічну стійкість, зокрема до лужного середовища цементного каменю. Завдяки мінеральній природі базальтова фібра забезпечує ефективне армування на мікро- та мезорівні, підвищуючи тріщиностійкість і довговічність бетону. Її перевагою є поєднання відносно високої міцності з корозійною стійкістю, що робить її перспективною для використання в дорожніх і гідротехнічних конструкціях.

Скляна фібра Armalit характеризується високою міцністю на розтяг (до 1200–1700 МПа) при порівняно низькому модулі пружності (70–80 ГПа)[7]. Вона ефективно працює на ранніх стадіях навантаження, обмежуючи розвиток мікротріщин та підвищуючи цілісність структури цементного каменю. Водночас її ефективність значною мірою залежить від лужної стійкості, оскільки звичайні скляні волокна можуть зазнавати деградації в середовищі цементного розчину. Використання лужностійких (AR) модифікацій дозволяє частково вирішити цю проблему.



Рис. 1. Фіброве армування бетону: (а) базальтова, (б) скляна, (в) сталева та (г) поліпропіленова фібри

Для забезпечення стабільних властивостей фібробетону доцільним є також використання суперпластифікаторів, що знижують водопотребу та підвищують щільність структури, а також повітровтягувальних добавок для підвищення морозостійкості [8].

Найбільше зниження водопотреби та ущільнення структури цементного каменю забезпечують суперпластифікатори на основі полікарбоксилатних ефірів. Застосування зазначених добавок дозволяє зменшувати водоцементне відношення на 20...40% та формувати щільну, однорідну структуру цементного каменю з підвищеними показниками міцності та довговічності.

Як суперпластифікуючу добавку для формування фібробетонних конструкцій застосовано Sika® ViscoCrete®-10 виробництва компанії Sika, що являє собою високоефективний суперпластифікатор на основі полікарбоксилатних ефірів. Рекомендоване дозування добавки при введенні у бетонні та розчинні суміші становить 0,5...1,0 % від маси в'язучого залежно від необхідної рухливості та складу бетонної суміші.

Як повітровтягувальну добавку для формування фібробетонних конструкцій застосовано UFAPORE CC85 виробництва компанії Bang & Bonsomer (концерн Mapei), що являє собою суміш аніоноактивних поверхнево-активних речовин. Рекомендоване дозування добавки при введенні у бетонні та розчинні суміші становить 0,02...0,05% від маси в'язучого.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз впливу різних типів фібри на фізико-механічні властивості бетонів, армованих дисперсними волокнами, а також визначення раціональних параметрів складу дорожнього фібробетону. Спираючись на результати попередніх досліджень [9], а також на зауваження та рекомендації, отримані під час обговорення результатів на наукових конференціях, було сформовано підхід до оцінювання ефективності різних видів фібрового армування у поєднанні з модифікуючими добавками. Такий підхід передбачає дослідження роботи окремих типів фібри у системах із суперпластифікаторами, повітровтягувальними та іншими добавками з метою визначення їх впливу на міцність та довговічність бетону.

На основі аналізу отриманих результатів було прийнято рішення про доцільність комплексного вивчення ефективності різних видів фібрового армування з модифікуючими добавками як на етапі використання окремих видів волокон, так і при їх подальшому одночасному комбінуванні [10, 11]. Це дозволило обґрунтувати раціональні параметри складу фібробетону та створити передумови для розроблення багатокомпонентних композицій із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Попри значну кількість досліджень, присвячених фібробетонам, у науковій літературі недостатньо уваги приділено поетапному обґрунтуванню вибору комбінованого армування.

Наявні публікації містять обмежені дані щодо такої послідовної методології, а також недостатньо висвітлюють вплив різних комбінацій волокон на властивості бетону в умовах тривалої експлуатації та хімічної корозії. Таким чином, існує наукова прогалина, пов'язана з відсутністю системного підходу до оцінювання ефективності окремих видів фібри як передумови для обґрунтованого вибору комбінованого армування та забезпечення довговічності бетону в агресивних середовищах.

Матеріали та методи. Основні експериментальні дослідження виконувалися із використанням методів математичного планування експериментів, що дало змогу раціонально організувати програму випробувань, оптимізувати кількість дослідів та забезпечити відповідність отриманих результатів статистичним вимогам. Склад бетонної суміші та технологія виготовлення дослідних зразків наведена в роботі [12]. Діапазони варіювання витрат сталевोї, поліпропіленової, базальтової та скляної фібри були визначені на підставі аналізу попередніх досліджень і узагальнення даних літературних джерел [10-13], у яких встановлено орієнтовні межі їх ефективного застосування. Для забезпечення коректного порівняння результатів технологічні параметри бетонних сумішей підтримували сталими в усіх точках експериментального плану.

У дослідженні розглянуто чотири типи фібри: сталеву анкерну, поліпропіленову, базальтову та скляну, які відрізняються механічними характеристиками та особливостями взаємодії з цементною матрицею. Дослідження включало контрольний склад без фібри, а також бетонні суміші з дисперсним армуванням поліпропіленовою фіброю MicroArm (довжина 20 мм), сталеву анкерною фіброю «Стальканат Силур» HE 50/0,9 (довжина 50 мм, діаметр 0,9 мм), базальтовою фіброю Technobasalt (довжина 24 мм) та скляною фіброю Armalit (довжина 24 мм). Усі дослідні суміші містили суперпластифікатор для забезпечення необхідної рухомості та однорідності бетонної суміші. Частину зразків виготовляли з додаванням повітровтягувальної добавки, а частину - без неї, що дало змогу оцінити вплив повітровтягування на міцнісні та деформаційні властивості фібробетону.

Після проведення випробувань результати були опрацьовані методами математичної статистики. На основі отриманих даних побудовано експериментально-статистичні моделі, які дали змогу кількісно оцінити ефективність кожного виду армування та визначити раціональні параметри складу бетонних композитів.



Рис. 2. Випробування призми із фібробетону на розтяг при згині



Рис. 3. Випробування зразків із фібробетону на стиск (а) та на розтяг (б)

Результати та обговорення. Перед формуванням гібридної системи армування необхідно провести системний аналіз ефективності окремих видів фібри (сталеві, поліпропіленові, базальтові, скляні)

тощо) та оцінити їх вплив на механічні характеристики, тріщиностійкість і довговічність бетону. Лише після визначення раціональних параметрів і областей ефективного застосування кожного типу волокон доцільно переходити до дослідження їх спільної дії та можливого синергетичного ефекту.

Додавання суперпластифікатора разом із фіброю та повітровтягувальною добавкою суттєво змінює структуру бетону, оскільки він знижує водоцементне відношення та підвищує рухливість суміші без втрати міцності. У дослідних зразках це призвело до підвищення міцності при стиску на +10...30%, а також покращення формування контактної зони «цементний камінь–заповнювач». У поєднанні з фіброю суперпластифікатор також сприяє більш рівномірному розподілу волокон у матриці, що підвищує ефективність їх роботи та зменшує ризик агломерації.

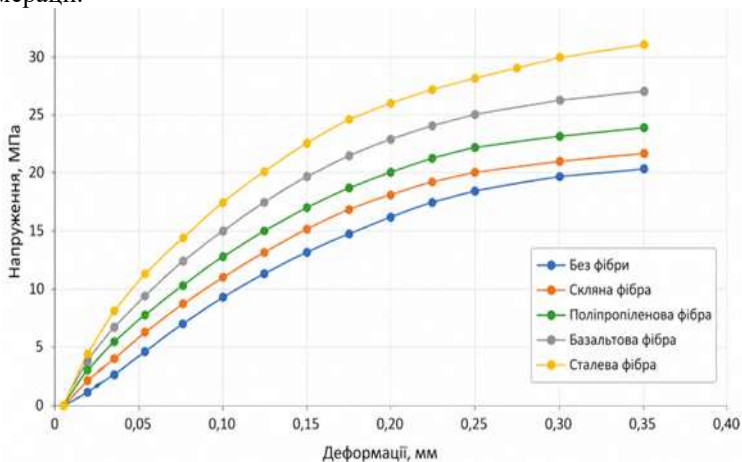


Рис. 4. Напруження від стиску зразків фібробетону, армованих фібрами

У системі із повітровтягувальною добавкою ефект суперпластифікатора проявляється менш виражено: він дозволяє зберегти технологічність суміші при зниженій густині, частково компенсуючи втрати міцності. У таких композиціях при стиску рівень міцності зменшується лише на 20%. При цьому фібра (особливо сталевая та базальтова) у присутності суперпластифікатора працює ефективніше, забезпечуючи при розтягу приріст до +25%, а при згині до +40%. У результаті формується багатокомпонентна система, де суперпластифікатор забезпечує щільність і технологічність, поризатор – деяке зниження

густини та збільшення морозостійкості, а фібра – тріщиностійкість і в'язкість руйнування.

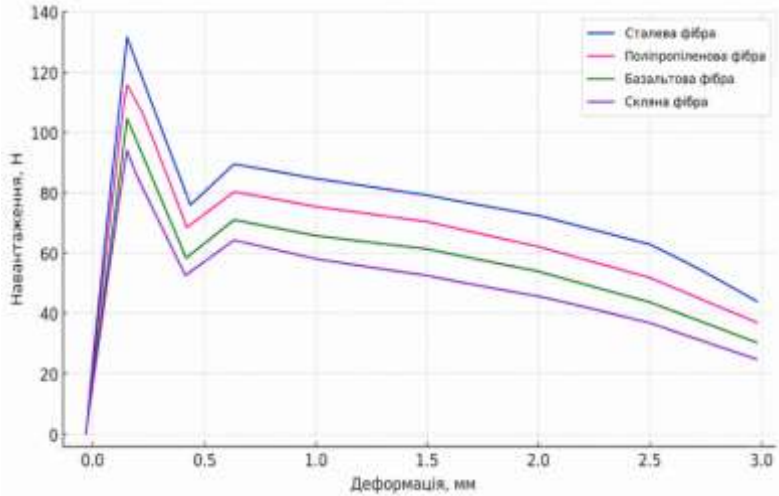


Рис. 5. Графік "навантаження-деформації" для зразків фібробетону, армованих фібрами

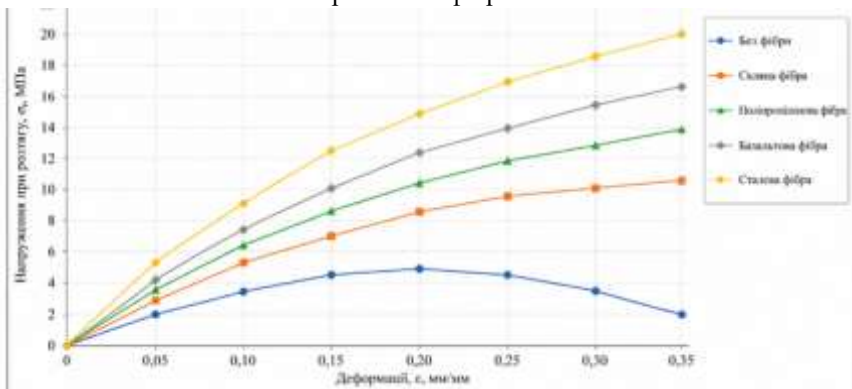


Рис. 6. Діаграма розтягу зразків фібробетону з різними типами фібри

Результати випробування зразків підтверджують доцільність застосування різних видів фібри. Сталева фібра є найбільш ефективною для підвищення міцності та тріщиностійкості фібробетону, що робить її доцільною для використання в жорсткому дорожньому одязі та конструкціях, які зазнають значних статичних і динамічних навантажень.

Поліпропіленова фібра забезпечує зменшення усадочного тріщиноутворення та підвищує стійкість бетону до агресивних середовищ, що є важливим для довговічності дорожніх покриттів. Базальтова фібра сприяє підвищенню міцності при згині, а скляна фібра покращує експлуатаційні характеристики бетону в конструкціях із помірними навантаженнями та корозійної стійкості матеріалу. Встановлено, що різні типи фібри впливають на фізико-механічні властивості дорожнього фібробетону та мають раціональні параметри введення у склад для конструкцій жорсткого дорожнього одягу. Показано, що визначені оптимальні дозування волокон і модифікуючих добавок забезпечують підвищення міцності та довговічності бетону.

Узагальнено фізико-механічні характеристики різних видів фібри та їх ефективність у складі бетонних композитів, що дозволило обґрунтувати вибір досліджуваних типів волокон і діапазонів їх дозування як основу для подальшого формування ефективних систем дисперсного та комбінованого (гібридного) армування.

Висновки. На основі експериментальних досліджень обґрунтовано ефективність застосування окремих видів фібри в поєднанні із суперпластифікаторами, повітровтягувальними добавками, що дозволило оцінити їх вплив на міцність дорожнього фібробетону. Встановлено, що зі збільшенням вмісту фібрового армування спостерігається зростання міцності при згині на всіх термінах твердіння, при цьому залежність має виражений екстремальний характер, що вказує на існування раціональних меж витрат дисперсної арматури. Найбільш ефективно та оптимальне застосування фібри встановлено в таких межах: для сталеві фібри — 80...100 кг/м³, для поліпропіленові — 2...3 кг/м³, для базальтового армування — 3...5 кг/м³, а для скляної фібри — 5...10 кг/м³. Підвищення дозування понад зазначені значення призводить до зниження рівномірності розподілу волокон у матриці, погіршення технологічності бетонної суміші та часткової втрати ефективності армування внаслідок утворення агломератів.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Solodkyi, S. Y., Tolmachov, S. M. (2016). *Betonnii dorozhnyi ta aerodromnyi pokryttia: Navchalnyi posibnyk*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. ISBN 978-966-941-030-6.
2. Dvorkin, L.; Konkol, J.; Marchuk, V.; Huts, A. Efficient, Fine-Grained Fly Ash Concrete Based on Metal and Basalt Fibers. *Materials* 2023, 16, 3969. <https://doi.org/10.3390/ma16113969>.
3. Paul, S. C., van Zijl, G. P. A. G., & Šavija, B. (2020). Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials*, 13(20), 4562. <https://doi.org/10.3390/ma13204562>.
4. Suchasni tekhnolohii armuvannia betonu. Fibra MicroArm 20 mm. Retrieved April 5, 2026, from FiberXMesh
5. Staleva fibra iz zihinutymy kintsiamy (HE). Retrieved April 5, 2026, from Stalkanat
6. Fibra bazaltova. Retrieved April 5, 2026, from Technobasalt-Invest
7. Fibra sklovolokonna 24 mm Armalit_BASE, art. 423 246. Retrieved April 5, 2026, from Armalitas
8. DSTU EN 934-2:2019. (2019). *Dobavky dlia betoniv i budivelnikh rozchyniv. Zahalni tekhnichni umovy. Chastyna 2. Dobavky dlia betoniv. Vyznachennia, vymohy, vidpovidnist, markuvannia, etyketuvannia (EN 934-2:2009 + A1:2012, IDT)*. Kyiv: DP “UkrNDNTs”.
9. Polishchuk O, Ziatiuk Y, Fursovych M, Supruniuk V, Romaniuk V. Combined Reinforcement as a Means of Increasing the Durability of Rigid Pavement. *MSF* 2025;1170:75–9. <https://doi.org/10.4028/p-bqtxa8>.
10. Polishchuk O, Ziatiuk Y, Fursovych M, Supruniuk V, Romaniuk V. Combined fiber-concrete corrosion resistance to compression under the action of an aggressive environment, *Procedia Structural Integrity*, Volume 81, 2026, Pages 316-320, ISSN 2452-3216. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.03.055>.
11. Dziomdziora, P.; Smarzewski, P. Effect of Hybrid Fiber Compositions on Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete: A Comprehensive Review. *Materials* 2025, 18, 2426. <https://doi.org/10.3390/ma18112426>
12. Ziatiuk, Y. Y., Polishchuk, O. M. (2025). Investigation of the performance of fiber-reinforced concrete using different types of reinforcing fibers. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 105-113. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-10](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-10).
13. Kroviakov S. O., Hedulian D. Iu., Kryzhanovskiy V. O., Zavoloka M. V., Yelkin A. V. Comparison of fiber concrete properties for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fiber. *Bulletin of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2022, №87. C.76-84. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-76-84>.

Література

1. Бетонні дорожні та аеродромні покриття: навч. посібник / С. Й., Солодкий, С. М., Толмачов. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 132 с. ISBN: 978-966-941-030-6.
2. Dvorkin, L.; Konkol, J.; Marchuk, V.; Huts, A. Efficient, Fine-Grained Fly Ash Concrete Based on Metal and Basalt Fibers. *Materials* 2023, 16, 3969. <https://doi.org/10.3390/ma16113969>.
3. Paul, S. C., van Zijl, G. P. A. G., Šavija, B. (2020). Effect of Fibers on Durability of Concrete: A Practical Review. *Materials*, 13(20), 4562. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13204562>
4. Сучасні технології армування бетону. Фібра MicroArm 20 мм https://fiberxmesh.com/files/Fiber_katalog_UKR.pdf (дата звернення: 05.04.2026).
5. Сталева фібра із згнутими кінцями (HE) <https://stalkanat.com.ua/ru/catalog/stalnaya-fibra-s-zagnutymi-konciami-he/> (дата звернення: 05.04.2026).
6. Фібра базальтова <https://technobasalt.com/reinforcing-materials-from-basalt-ua/basalt-fiber-ua/> (дата звернення: 05.04.2026).
7. Фібра скловолоконна 24 мм Armalit_BASE, арт. 423 246 <https://armalitas.com/product/fibra-skvolokonna-24-mm/> (дата звернення: 05.04.2026).
8. ДСТУ EN 934-2:2019. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови. Частина 2. Добавки для бетонів. Визначення, вимоги, відповідність, маркування, етикетування (EN 934-2:2009 + A1:2012, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 32 с.
9. Зятюк Ю.Ю., Поліщук О.М. (2025). Дослідження роботи фібробетону при використанні різних армуючих волокон. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 23, 105-113. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-10](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-10)
10. Polishchuk O, Ziatiuk Y, Fursovych M, Supruniuk V, Romaniuk V. Combined fiber-concrete corrosion resistance to compression under the action of an aggressive environment, *Procedia Structural Integrity*, Volume 81, 2026, Pages 316-320, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.03.055>.
11. Dziomdziora, P.; Smarzewski, P. Effect of Hybrid Fiber Compositions on Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete: A Comprehensive Review. *Materials* 2025, 18, 2426. <https://doi.org/10.3390/ma18112426>
12. Ziatiuk, Y. Y., Polishchuk, O. M. (2025). Investigation of the performance of fiber-reinforced concrete using different types of reinforcing fibers. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 105-113. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-10](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-10).
13. Kroviakov S. O., Hedulian D. Iu., Kryzhanovskiy V. O., Zavoloka M. V., Yelkin A. V. Comparison of fiber concrete properties for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fiber. *Bulletin of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2022, №87. С.76-84. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-76-84>.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 15.05.2026	Received 15.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 22.05.2025	Received in revised form 22.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

Y. Y. Ziatiuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3831-6599>
Department of Automobile Roads, Bases and Foundations

O. M. Polischuk

Postgraduate, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5700-8679>

Department of Automobile Roads, Bases and Foundations

National University of Water and Environmental Engineering, Soborna St., 11, Rivne, Ukraine, 33028

*corresponding author, e-mail: y.y.ziatiuk@nuwm.edu.ua

Efficiency of Using Fiber Reinforcement and Modifying Admixtures in Concrete for Rigid Pavements

How to Cite:

Ziatiuk, Y. Y., Polischuk, O. M. (2026). Efficiency of using fiber reinforcement and modifying admixtures in concrete for rigid pavements. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 338-349. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-25](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-25)

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the mechanical properties of fiber-reinforced concrete incorporating various types of dispersed reinforcement, including steel, polypropylene, glass, and basalt fibers. The aim of the study is to evaluate the influence of fiber type and dosage on the compressive, axial tensile, and flexural strength of concrete, as well as on its crack resistance and deformability. The main advantages of fiber-reinforced concrete include reduced labor intensity of conventional reinforcement works, improved operational reliability of structures, and the integration of reinforcement, mixing, and placing processes into a single technological operation.

The experimental program included testing concrete cubes in compression, prisms in axial tension, and prisms in flexure. The study was carried out using methods of mathematical design of experiments, which made it possible to reduce the number of tests while ensuring high reliability of the obtained results. It was established that the incorporation of fibers increases the strength, ductility, and crack resistance of concrete, while the degree of improvement depends on the physical and mechanical properties of the fibers.

Steel fiber provided the greatest increase in tensile and flexural strength due to its high modulus of elasticity and its ability to effectively resist tensile stresses. Polypropylene fiber improved crack resistance, reduced shrinkage cracking, and enhanced the resistance of concrete to aggressive environmental conditions. Glass and basalt fibers contributed to increased flexural strength and improved durability owing to their high corrosion resistance and good adhesion to the cement matrix.

The obtained results confirm the effectiveness of using different types of fibers to improve the mechanical characteristics of concrete and substantiate the feasibility of applying fiber-reinforced concrete in road construction, transportation infrastructure, and other structures subjected to intensive loading, long-term service, and adverse environmental effects..

Keywords: fiber-reinforced concrete (FRC), road pavements, airfield pavement, reinforcing fiber, strength, compression.

УДК 624.01:691]:[727:699.852]-044.247

В. В. Петров*

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5173-4279>

Кафедра архітектури будівель та дизайну

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Першотравневий, 24, Полтава, Україна, 36011

*автор-кореспондент, e-mail: peeterssonn@gmail.com

Сучасні конструктивні системи для будівництва ЗЗСО із захисними спорудами: матеріали, технології

Цитувати як:

Петров, В. В. (2026). Сучасні конструктивні системи для будівництва ЗЗСО із захисними спорудами: матеріали, технології. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 350-366. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-26)

© 2026, Автор. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. Стаття присвячена аналізу сучасних конструктивних систем, матеріалів і технологій, що застосовуються під час проєктування закладів загальної середньої освіти (ЗЗСО) із вбудованими або прибудованими захисними спорудами цивільного захисту. Актуальність дослідження визначається потребою забезпечення безперервності освітнього процесу в умовах воєнних загроз в Україні, коли шкільна будівля має поєднувати навчальну та захисну функції. Метою статті є визначення конструктивних рішень, здатних забезпечити безпеку, функціональну придатність, довговічність і подальше використання захисних просторів у мирний час. У роботі використано порівняльний аналіз нормативних вимог, узагальнення наукових публікацій, систематизацію конструктивних рішень і архітектурно-планувальний аналіз укриттів у складі освітніх об'єктів. Обґрунтовано доцільність каркасно-монолітної залізобетонної системи як основи інтеграції захисних споруд у структуру школи, оскільки вона забезпечує просторову жорсткість, планувальну гнучкість і резервний перерозподіл зусиль. Окремо розглянуто застосування фібробетону та комбінованого армування у плитах перекриття, ригелях і вузлах каркаса, що можуть сприймати динамічні, ударні та вибухові навантаження. Проаналізовано локалізацію прогресуючого руйнування, герметизацію швів і вводи інженерних комунікацій, вентиляцію, автономне життєзабезпечення та природне освітлення через світловоди. Визначено інженерно-технологічні умови придатності просторів до тривалого перебування. Встановлено, що ефективність шкільної будівлі із захисною спорудою залежить від узгодження конструктивної схеми, інженерного обладнання, планувальної логіки та сценаріїв експлуатації. Запропоновано інтегративний підхід, за якого укриття

розглядається як постійний елемент освітньої інфраструктури, придатний для безпечного перебування, навчання і подальшої адаптації.

Ключові слова: шкільні будівлі, захисні споруди, каркасно-монолітна система, фібробетон, прогресуюче руйнування.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Запровадження в Україні правового режиму воєнного стану відповідно до Указу Президента України від 24.02.2022 № 64/2022 «Про введення воєнного стану в Україні» актуалізувало необхідність перегляду підходів до проектування закладів загальної середньої освіти. У цьому контексті особливого значення набуває інтеграція захисних споруд цивільного захисту у структуру шкільних будівель, що узгоджується з вимогами ДБН В.2.2-5:2023 щодо проектування захисних споруд, протирадіаційних укриттів і споруд подвійного призначення, а також із Порядком створення, утримання фонду захисних споруд цивільного захисту, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 10.03.2017 № 138. Укриття більше не можуть існувати як тимчасові або ізольовані простори - вони мають бути повноцінно інтегрованими у функціональну та конструктивну систему освітнього середовища. Водночас більшість наявних будівель не пристосовані до таких викликів, а чинні нормативи лише частково регламентують архітектурно-конструктивні підходи до реалізації укриттів у школах. Проблема ускладнюється відсутністю усталеної практики поєднання безпеки, функціональності та комфортності в межах одного архітектурного рішення. Створення просторів, здатних витримувати вибухові та ударні навантаження, потребує використання спеціальних матеріалів, зокрема фібробетону, і конструктивних систем, стійких до прогресуючого руйнування. Аналіз публікацій [3-13] засвідчує, що питання захисних споруд у закладах освіти розглядається переважно через окремі конструктивні, інженерні або організаційні аспекти, тоді як комплексне поєднання конструктивної системи, архітектурного планування, інженерного забезпечення, ударостійких матеріалів і подальшої адаптації укриттів потребує додаткового наукового опрацювання.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є аналіз сучасних конструктивних систем, матеріалів і технологій, що застосовуються при проектуванні та будівництві шкільних будівель із захисними спорудами, з визначенням ефективних технічних рішень для забезпечення надійності, функціональності та адаптивності таких споруд в умовах воєнного і мирного часу. Завдання дослідження полягають у систематизації нормативних і наукових джерел, визначенні переваг каркасно-монолітної системи, аналізі потенціалу фібробетону та комбінованого армування, а також в узагальненні інженерних рішень щодо герметизації, вентиляції, освітлення й автономного забезпечення укриттів.

Матеріали та методи

Матеріалами дослідження слугували положення ДБН В.2.2-5:2023 щодо захисних споруд цивільного захисту [1], практичний посібник з проєктування укриттів у закладах дошкільної та загальної середньої освіти [2], а також наукові праці, присвячені типології цивільних укриттів, високошвидкісному ударному навантаженню, фібробетону, прогресуючому руйнуванню, вибухостійкості залізобетонних плит і системам природного освітлення підземних приміщень [3–13]. Практичний посібник використано як прикладну основу для аналізу типів захисних споруд, їх розташування, міцкості, об'ємно-планувальних рішень, входів, аварійних виходів, інклюзивності та організації внутрішнього простору [2].

Методика дослідження передбачає порівняльний аналіз конструктивно-технологічних рішень, що можуть застосовуватися при новому будівництві закладів загальної середньої освіти із вбудованими або прибудованими захисними спорудами. Оцінювання виконувалося за такими критеріями: стійкість до динамічних і вибухових впливів, опір прогресуючому руйнуванню, планувальна гнучкість, технологічність виконання будівельних робіт, герметичність захисного об'єму, ремонтпридатність, доступність матеріалів, орієнтовна вартість та експлуатаційна придатність у штатному режимі використання будівлі.

Для порівняльного аналізу було обрано три рішення, які відповідають темі нового будівництва ЗЗСО із захисними спорудами: каркасно-монолітну залізобетонну систему з традиційним армуванням, каркасно-монолітну систему з використанням фібробетону та комбінованого армування у критичних елементах, а також збірно-монолітну залізобетонну систему.

Результати та обговорення

Сучасне будівництво закладів загальної середньої освіти в Україні має враховувати не лише освітню функцію, а й вимоги до безпеки дітей під час надзвичайних ситуацій. В умовах воєнної загрози особливо актуальним є проєктування будівель із вбудованими або прибудованими захисними спорудами цивільного захисту. Це можуть бути протирадіаційні укриття (ПРУ) або споруди подвійного призначення (СПП), розміщені у підвальному, цокольному чи прибудованому об'ємі. Для більш гнучкого користування та подальшої адаптації захисних приміщень після завершення бойових дій доцільним є використання саме СПП, однак остаточний вибір типу захисної споруди має визначатися залежно від містобудівних умов, конструктивних можливостей будівлі та рівня потенційної загрози. Водночас у будь-якому випадку конструктивна система таких об'єктів повинна бути функціональною, енергоефективною та стійкою до дії вибухових і ударних навантажень.

Найбільш придатною для інтеграції захисних споруд є каркасно-монолітна система, яка забезпечує високу просторову жорсткість, гнучкість у плануванні та можливість формування об'ємних приміщень зі зниженим ризиком прогресуючого обвалення. При цьому використовуються залізобетонні елементи (колони, ригелі, плити перекриття), які можуть бути посилені за рахунок використання багат шарового армування. Важливим є і правильне компонування конструктивної сітки. Наприклад, сітка колон $6 \times 4,5$ м або 6×6 м є оптимальною з точки зору балансу між гнучкістю архітектурного планування і міцністю конструкцій. У зоні розміщення захисних споруд сітка може бути ущільнена або доповнена жорсткими ядрами (сходові клітки, діафрагми жорсткості), що посилює здатність будівлі протистояти динамічним впливам.

Важливе значення має також вибір конфігурації укриття. Найефективнішими з точки зору розподілу тиску вважаються прямокутні об'єми з обмеженою кількістю кутів і виступів. Такі форми зменшують зони концентрації напружень, покращують аеродинаміку внутрішніх об'ємів у разі проникнення хвилі та спрощують евакуаційні маршрути. Вхідні групи доцільно проектувати у вигляді тамбурів з подвійними протибалістичними дверима. Деякі дослідження також пропонують застосування подвійного контуру захисту — периметрального армованого шару та внутрішньої еластичної обшивки, здатної демпфувати імпульс. Отже, конструктивна ефективність захисної споруди визначається не окремим параметром міцності, а взаємозв'язком просторової схеми, геометрії об'єму, типу несучих елементів і матеріалу огорожувальних конструкцій. Для закладів загальної середньої освіти це має особливе значення, оскільки захисний простір повинен одночасно відповідати вимогам безпеки, забезпечувати зрозумілу евакуаційну логіку, не ускладнювати повсякденну експлуатацію будівлі та зберігати можливість подальшого функціонального використання. Тому вибір матеріалу для основних конструктивних елементів укриття має розглядатися не ізольовано, а як частина загальної архітектурно-конструктивної моделі будівлі.

При проектуванні укриттів одним із визначальних критеріїв є вибір конструкційного матеріалу, придатного для роботи в умовах короточасних динамічних навантажень. Доцільність матеріалу визначається за сукупністю параметрів: міцністю на стиск і розтяг, тріщиностійкістю, ударостійкістю, стійкістю до дії вибухової хвилі, довговічністю, вогнестійкістю, водонепроникністю, технологічністю виконання робіт, доступністю на будівельному ринку, економічною ефективністю, ремонтопридатністю та здатністю забезпечувати стабільну роботу конструкції в умовах короточасних динамічних навантажень.

Саме за сукупністю цих параметрів доцільним матеріалом для захисних споруд є фібробетон. На відміну від звичайного бетону, він має

підвищену тріщиностійкість і краще працює при дії короткочасних динамічних навантажень, зокрема ударних та вибухових впливів. Наявність дисперсного армування у вигляді сталевий, базальтової або полімерної фібри дає змогу більш рівномірно розподіляти напруження в тілі конструкції, обмежувати розвиток тріщин і зменшувати ризик крихкого руйнування. Результати досліджень сталевіфробетонних плит під ударним навантаженням засвідчують підвищення несучої здатності, зменшення ширини і кроку тріщин та локальних пошкоджень порівняно зі звичайним залізобетоном [6]. Огляд досліджень ударостійкості бетонних і фібробетонних елементів також підтверджує, що фіброве армування знижує ризик відколювання, продавлювання та втрати цілісності конструкції при високошвидкісному впливі [7]. Для шкільних укриттів це означає можливість підвищення живучості плит перекриття, стін, ригелів і вузлів каркаса без втрати експлуатаційної придатності простору.

Для уточнення механізму локального руйнування бетонних елементів при високошвидкісному ударному навантаженні на рис. 1–3 наведено схеми поширення хвиль напружень, основні стадії пошкодження бетонної плити та спосіб вимірювання параметрів локального руйнування. Ці схеми характеризують базову поведінку бетонного елемента під дією ударника і використовуються як вихідна основа для подальшого аналізу доцільності фібрового та комбінованого армування. Приклади роботи плит із комбінованим армуванням і фібробетонних зразків наведено на рис. 4.



Рис. 1. Поширення стискальної та розтягальної хвиль у бетонному елементі при високошвидкісному ударному навантаженні [7]

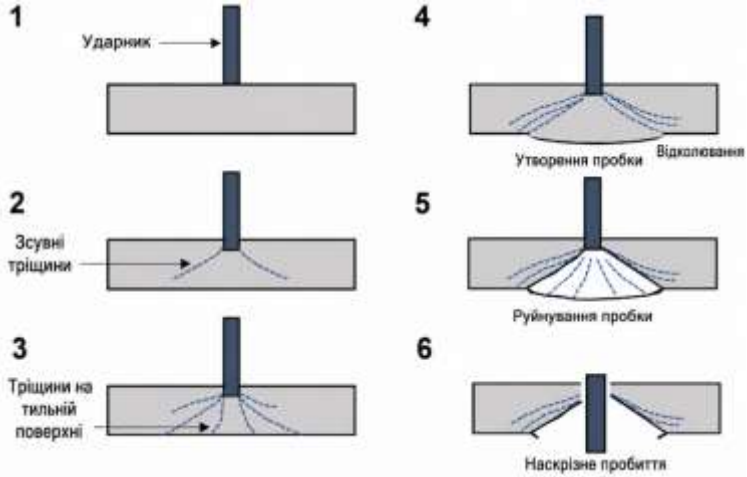


Рис. 2. Послідовність стадій локального руйнування бетонної плити при ударному навантаженні: 1 — початковий контакт ударника з плитою; 2 — утворення зсувних тріщин; 3 — формування тріщин на тильній поверхні; 4 — утворення бетонної пробки та тильне виколування; 5 — руйнування пробки; 6 — наскрізне пробиття [7]

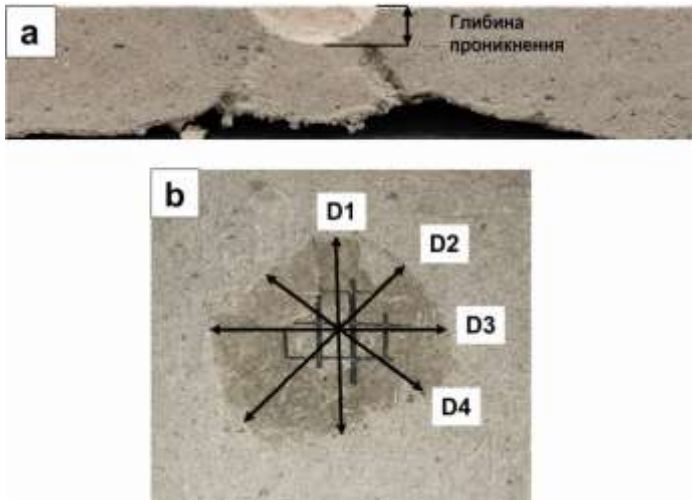


Рис. 3. Схема вимірювання параметрів локального руйнування бетонної плити при ударному навантаженні: а — глибина проникнення ударника; б — вимірювання діаметра зони відколювання / тильного виколування; D1–D4 — напрямки вимірювання діаметра зони локального пошкодження [7]



Рис. 4. Характер руйнування дослідної залізобетонної плити з комбінованим армуванням при високошвидкісному ударі: а — зона локального пошкодження; б — схема армування плити до взаємодії з ударником [4]

Стійкість до прогресуючого руйнування є одним із ключових критеріїв вибору конструктивної системи для будівель ЗСГО із захисними спорудами. Це стосується як споруд подвійного призначення, так і протирадіаційних укриттів, інтегрованих у структуру навчального закладу. Прогресуюче руйнування виникає внаслідок локального виходу з ладу одного або кількох елементів несучої системи, що може спричинити каскадне обвалення суміжних конструкцій. Для об'єктів з масовим перебуванням людей така ситуація є особливо небезпечною, оскільки навіть локальне пошкодження може призвести до втрати несучої здатності окремих ділянок, утворення уламків і підвищення ризику травмування користувачів укриття.

Каркасно-монолітна система дає змогу реалізувати принцип конструктивної резервності, коли навантаження при руйнуванні одного елемента може перерозподілятися на суміжні конструкції без втрати несучої здатності всієї будівлі. Завдяки цілісності залізобетонного каркаса, зв'язку колон, ригелів і плит перекриття в єдину жорстку систему, відбувається часткове поглинання імпульсу, що захищає від прогресуючого обвалення. Такий принцип також забезпечує стійкість при сейсмічних коливаннях або локальному вибуховому навантаженні.

Ефективність підвищується за рахунок використання фібробетону в критичних елементах, зокрема у плитах перекриття над укриттям, ригелях і зонах сполучення несучих елементів, де можливе виникнення крихкого руйнування. Дисперсне армування фіброю дозволяє локалізувати тріщини, підвищити деформаційну здатність конструкції та уникнути раптового обвалення при досягненні граничних станів. Дослідження застосування

високоміцних фіброармованих цементних композитів у вузлах залізобетонних каркасів також підтверджують їхній потенціал для підвищення стійкості будівель до прогресуючого руйнування [8].

Варіанти конструктивного армування залізобетонної плити та характер проникнення ударника залежно від типу армування наведено на рис. 5.

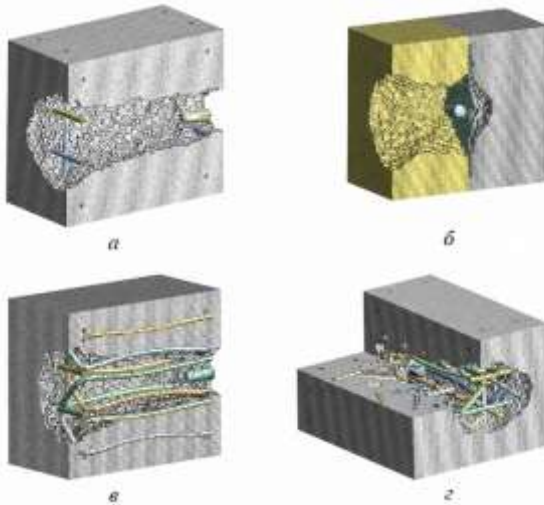


Рис. 5. Характер проникнення ударника в дослідні залізобетонні плити з різними типами армування: а — подвійна сітка; б — суцільний металевий лист; в — подвійна сітка з поперечною арматурою; г — комбіноване армування з поперечною арматурою, подвійною сіткою та фіброю [4]

У таких умовах доцільним є формування вторинних шляхів передачі зусиль (наприклад, через монолітні діафрагми жорсткості або додаткові армовані пояси), які можуть прийняти навантаження при виході з ладу основних елементів. Поєднання монолітного залізобетону з фіброармуванням формує підґрунтя для створення конструкцій з високою стійкістю до прогресуючих руйнувань. Це є принципово важливим у проектуванні шкільних будівель, де укриття інтегруються безпосередньо в просторову структуру будівлі та повинні зберігати цілісність навіть при частковому руйнуванні окремих конструктивних вузлів.

Але проектування захисних споруд у складі освітніх будівель вимагає не лише вибору конструктивної системи, а й застосування

відповідних технологій зведення, що дозволяють забезпечити герметичність, стійкість до вибухової хвилі та функціональність у довготривалому використанні.

Однією з головних задач інженерного етапу є забезпечення герметичності укриттів. Для цього застосовуються спеціалізовані добавки до бетонів, внутрішні ущільнюючі шви та гідроізоляційні прошарки. Наприклад, для перекриттів, що слугують одночасно перекриттям підвалу й підлогою першого поверху, доцільно використовувати полімерно-бітумну мембрану на бетонній основі, яка утворює бар'єр для вологи та пилу. Також важливо облаштовувати деформаційні шви з еластичними компенсаторами, які зберігають герметичність при температурних або динамічних зсувних впливах.

Окрема увага приділяється формуванню отворів та інженерних вводів, оскільки саме ці зони є найуразливішими при вибуховому навантаженні. Згідно з рекомендаціями [1], отвори для вентиляційних шахт, кабельних каналів та евакуаційних виходів мають проектуватися із застосуванням вибухостійких клапанів і протипожежних закладних елементів, а інженерні канали — проходити через ущільнювачі з негорючих еластомерів. Інженерні вводи доцільно розглядати як одну з найуразливіших зон захисного об'єму, де герметичність забезпечується не лише матеріалом огорожувальної конструкції, а й комплексом вузлових рішень: гільзами, ущільнювачами, протипожежними закладними елементами та захищеним прокладанням мереж.

Вентиляція та мікроклімат у межах укриття також є критичними для безпечного перебування людей. У сучасних рішеннях передбачаються системи з механічним або комбінованим припливно-витяжним режимом, часто з резервним живленням від акумуляторів. Приміщення повинні мати повітрообмін згідно з нормами, встановленими ДБН, а також системи фільтрації повітря — у разі хімічної загрози. Обладнання вентиляції розміщується у відокремлених камерах із шумоізоляцією та можливістю обслуговування в мирний час.

Важливо забезпечити автономність життєзабезпечення укриттів. У практиці реалізованих об'єктів передбачається встановлення акумуляторних освітлювальних систем, автономних джерел водопостачання, санітарних вузлів з накопичувальними резервуарами та резервних систем електроживлення. Також актуальним є використання енергозберігаючих технологій, зокрема пасивного освітлення. Одним із таких рішень є трубчасті системи денного освітлення, які передають природне світло з поверхні у внутрішні, підземні або напівпідземні простори будівлі. Огляд досліджень трубчастих світловодів засвідчує їхню придатність для підвищення рівня природного освітлення і зменшення

витрат електроенергії на штучне освітлення [11, 12]. Застосування подібних систем у захисних просторах ЗЗСО може покращити психоемоційний комфорт користувачів і знизити експлуатаційне навантаження на інженерні системи. Саме тому при проектуванні та будівництві захисних споруд ЗЗСО доцільно розглядати трубчастий світловод як технологічне рішення для передавання природного освітлення до підземних або напівпідземних приміщень. Принципову схему роботи трубчастого світловоду наведено на рис. 6.

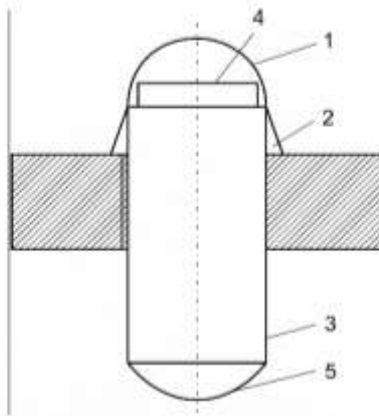


Рис. 6. Принципова схема трубчастого світловоду для передавання природного світла у внутрішні, підземні або напівпідземні приміщення: 1 — світлоприймальний купол зі світлопрозорого пластику; 2 — покрівельний скляний вузол, інтегрований у покриття; 3 — трубчастий світлопровідний канал; 4 — світлоспрямувальний пристрій; 5 — дифузор для розподілу світла в інтер'єрі [11]

З огляду на постійну загрозу обстрілів, захисні споруди у складі шкільних будівель мають бути стійкими до динамічного впливу вибухової хвилі. Відповідно до вимог [1], укриття повинні забезпечувати нормативні захисні властивості, зокрема сприймати надлишковий тиск без втрати несучої здатності основних огорожувальних конструкцій. Дослідження залізобетонних плит при контактних вибухах і фіброармованих бетонних плит підтверджують, що підвищення міцності бетонної матриці, фіброве армування та раціональне конструктивне армування зменшують локальні пошкодження, відколювання і ризик наскрізного руйнування [9, 10]. Це обґрунтовує застосування комбінованих залізобетонних і фібробетонних

конструкцій, параметри яких мають уточнюватися спеціальним розрахунком залежно від класу споруди, глибини закладення та очікуваного рівня загрози.

Узагальнення результатів аналізу конструктивних, матеріальних та інженерно-технологічних рішень наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняльна оцінка конструктивно-технологічних рішень для нового будівництва ЗССО із захисними спорудами

Критерій оцінювання	Каркасно-монолітна ЗБ система	Каркасно-монолітна ЗБ система з фібробетоном	Збірно-монолітна ЗБ система
Стійкість до динамічних і вибухових впливів	Достатня за умови спец. розрахунку	Вища завдяки стримуванню тріщин фіброю	Залежить від якості стиків і вузлів
Опір прогресуючому руйнуванню	Високий завдяки цілісності каркаса	Найбільш високий через поєднання монолітності й фіброармування	Середній; критичними є стики елементів
Планувальна гнучкість	Висока, зручна для шкільних планувань	Висока, оскільки базова схема не змінюється	Залежить від типорозмірів елементів
Технологічність будівництва	Трудомістка технологія	Потребує контролю складу суміші та укладання	Вища швидкість монтажу
Герметичність захисного	Досягається через якісну гідроізоляцію	Вища при правильній герметизації швів	Ускладнена через більшу кількість

об'єму	й обробку швів	і вводів	стиків
Придатність до ремонту	Можливий локальний ремонт	Краща за рахунок меншого тріщиноутворення	Залежить від доступності
Доступність матеріалів	Бетон і арматура поширені	Середня/висока: потрібна якісна фібра	Висока для типових елементів
Вартість	Залежить від обсягу робіт	Вища, але виправдана для критичних зон	Заводське виготовлення і монтаж
Експлуатаційна придатність	Висока	Висока, з підвищеною конструктивною надійністю	Залежить від габаритів і стиків

Результати порівняння підтверджують, що найбільш збалансованим рішенням для нового будівництва ЗЗСО із захисними спорудами є каркасно-монолітна залізобетонна система з локальним використанням фібробетону у критичних елементах. Таке рішення поєднує просторову жорсткість, планувальну гнучкість, підвищену тріщиностійкість і можливість інтеграції інженерних систем у структуру будівлі. Водночас його ефективність залежить від спеціального розрахункового обґрунтування, контролю складу фібробетонної суміші, якості армування та ретельного опрацювання вузлів герметизації.

Водночас не слід розглядати вибір одного універсального конструктивного рішення для всіх шкільних об'єктів. Для практичного проектування важливим є поєднання базової каркасно-монолітної системи з локальним посиленням тих елементів, які мають найбільше значення для стійкості захисного об'єму: плит перекриття, стін, ригелів, вузлів каркаса, інженерних вводів і вхідних груп. Саме така комбінація дозволяє перейти від загальної оцінки матеріалів і технологій до формування цілісної моделі шкільної будівлі із захисним простором.

Висновки

У результаті порівняльного аналізу встановлено, що для нового будівництва ЗЗСО із вбудованими або прибудованими захисними спорудами пріоритетним конструктивним рішенням є каркасно-монолітна залізобетонна система. Її перевага полягає у просторовій цілісності каркаса, планувальній гнучкості, можливості формування підземних і напівпідземних захисних об'ємів та здатності до перерозподілу зусиль у разі локального пошкодження окремих елементів.

Визначено, що фібробетон доцільно застосовувати не як універсальну заміну традиційному залізобетону, а локально — у критичних елементах, які можуть сприймати короточасні динамічні, ударні або вибухові впливи. До таких елементів належать плити перекриття над захисним об'ємом, стіни укриття, ригелі та вузли сполучення несучих конструкцій. У цих зонах дисперсне армування підвищує тріщиностійкість, зменшує ризик крихкого руйнування та сприяє збереженню цілісності конструкції після локального пошкодження.

Критичними для експлуатаційної придатності укриттів є комбіноване армування відповідальних елементів, герметизація швів і введів інженерних комунікацій, встановлення вибухостійких елементів, організація вентиляції, резервного електроживлення, автономного забезпечення та систем освітлення, зокрема з можливим використанням світловодів. Ефективність таких рішень визначається не окремим матеріалом або технологією, а їх узгодженням із конструктивною схемою, планувальною організацією та режимами експлуатації будівлі.

Запропонований підхід має обмеження і не може застосовуватися як універсальна типова схема без додаткового обґрунтування. Остаточні параметри конструкцій, склад фібробетону, тип армування, рівень герметизації, глибина закладення та інженерне обладнання мають визначатися спеціальним розрахунком з урахуванням класу захисної споруди, розрахункового навантаження, містобудівних, геологічних і експлуатаційних умов.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що не має конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження або результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи він не використовував технології штучного інтелекту.

References

1. Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy. (2023). DBN V.2.2-5:2023. Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu. Kyiv. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3869917268095796623?doc_type=2
2. Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy. (2023). Praktychnyi posibnyk z proiektuvannya ukryttiv u zakladakh doshkilnoi ta zahalnoi serednoi osvity. Kyiv. <https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/865/1.pdf>
3. Malik, T. V., Kovalov, Yu. M., Kalashnikova, V. V., & Nerusheva, V. M. (2023). Bahatokryterialna optymizatsiia dyzainu tsyvilnykh ukryttiv v Ukraini z urakhuvanniam izraillskoho dosvidu. Art and Design, 2(22), 170-178. <https://doi.org/10.30857/2617-0272.2023.2.15>
4. Afanasieva, L. V., & Lavrinenko, L. I. (2024). Konstruktsii zakhysnykh sporud v umovakh vysokoshydkisnoho udaru. Mistobuduvannya ta terytorialne planuvannya, 86, 230-242. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.86.230-242>
5. Skoruk, O. (2022). Doslidzhennia roboty fibrobetonu v konstruktsiiakh pry dynamichnykh vplyvakh. Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka, 11, 44-52. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.44-52>
6. Hrynyk, T. D., & Vecchio, F. J. (2014). Behavior of steel fiber-reinforced concrete slabs under impact load. ACI Structural Journal, 111(5), 1213-1224. <https://doi.org/10.14359/51686923>
7. Esaker, M., Thermou, G., & Neves, L. (2023). Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review. International Journal of Impact Engineering, 180, 104722. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104722>
8. Mirzahassemi, H., Mirhosseini, S. M., & Zeighami, E. (2023). Robustness assessment of RC frame buildings with HPFRCC subjected to progressive collapse. Results in Engineering, 17, 100809. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100809>
9. Draganić, H., Jeleč, M., Gazić, G., & Lukić, S. (2025). Numerical investigations of reinforced concrete slabs subjected to contact explosions. Buildings, 15(7), 1063. <https://doi.org/10.3390/buildings15071063>
10. Rathnayaka, P. T. K., Son, K., Kwak, H.-G., Yoo, S.-J., & Lee, J.-Y. (2026). Experimental and numerical investigations of blast resistance of fiber-reinforced concrete slabs. Buildings, 16(4), 686. <https://doi.org/10.3390/buildings16040686>
11. Li, H., Wu, D., Yuan, Y., & Zuo, L. (2022). Evaluation methods of the daylight performance and potential energy saving of tubular daylight guide systems: A review. Indoor and Built Environment, 31(2), 299-323. <https://doi.org/10.1177/1420326X21992419>

12. Malet-Damour, B., Bigot, D., & Boyer, H. (2020). Technological review of tubular daylight guide system from 1982 to 2020. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 5(3), 375-386.
<https://doi.org/10.24018/ejeng.2020.5.3.1809>
13. Dovzhenko, O. O., Yurko, I. A., & Kravchenko, V. V. (2009). Zastosuvannia fibrobetonu v Ukraini. Vlastyvosti dyspersno armovanykh betoniv. *Komunalne hospodarstvo mist*, 90, 267-272.
https://eprints.kname.edu.ua/16031/1/267-272_%D0%94%D0%BE%D0%B2%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%9E%D0%9E.pdf

Література

1. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. (2023). ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ.
https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3869917268095796623?doc_type=2
2. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. (2023). Практичний посібник з проєктування укриттів у закладах дошкільної та загальної середньої освіти. Київ.
<https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/865/1.pdf>
3. Малік, Т. В., Ковальов, Ю. М., Калашнікова, В. В., & Нерушева, В. М. (2023). Багатокритеріальна оптимізація дизайну цивільних укриттів в Україні з урахуванням ізраїльського досвіду. *Art and Design*, 2(22), 170-178.
<https://doi.org/10.30857/2617-0272.2023.2.15>
4. Афанасьєва, Л. В., & Лаврінєнко, Л. І. (2024). Конструкції захисних споруд в умовах високошвидкісного удару. *Містобудування та територіальне планування*, 86, 230-242.
<https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.86.230-242>
5. Скорук, О. (2022). Дослідження роботи фібробетону в конструкціях при динамічних впливах. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 11, 44-52.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.44-52>
6. Hrynyk, T. D., & Vecchio, F. J. (2014). Behavior of steel fiber-reinforced concrete slabs under impact load. *ACI Structural Journal*, 111(5), 1213-1224.
<https://doi.org/10.14359/51686923>
7. Esaker, M., Thermou, G., & Neves, L. (2023). Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review. *International Journal of Impact Engineering*, 180, 104722.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104722>
8. Mirzahosseini, H., Mirhosseini, S. M., & Zeighami, E. (2023). Robustness assessment of RC frame buildings with HPFRCC subjected to progressive collapse. *Results in Engineering*, 17, 100809.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100809>

9. Draganić, H., Jeleč, M., Gazić, G., & Lukić, S. (2025). Numerical investigations of reinforced concrete slabs subjected to contact explosions. *Buildings*, 15(7), 1063. <https://doi.org/10.3390/buildings15071063>

10. Rathnayaka, P. T. K., Son, K., Kwak, H.-G., Yoo, S.-J., & Lee, J.-Y. (2026). Experimental and numerical investigations of blast resistance of fiber-reinforced concrete slabs. *Buildings*, 16(4), 686. <https://doi.org/10.3390/buildings16040686>

11. Li, H., Wu, D., Yuan, Y., & Zuo, L. (2022). Evaluation methods of the daylight performance and potential energy saving of tubular daylight guide systems: A review. *Indoor and Built Environment*, 31(2), 299-323. <https://doi.org/10.1177/1420326X21992419>

12. Malet-Damour, B., Bigot, D., & Boyer, H. (2020). Technological review of tubular daylight guide system from 1982 to 2020. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 5(3), 375-386. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2020.5.3.1809>

13. Довженко, О. О., Юрко, І. А., & Кравченко, В. В. (2009). Застосування фібробетону в Україні. Властивості дисперсно армованих бетонів. Комунальне господарство міст, 90, 267-272. https://eprints.kname.edu.ua/16031/1/267-272_%D0%94%D0%BE%D0%B2%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%9E%D0%9E.pdf

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 15.05.2026	Received 15.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 22.05.2026	Received in revised form 22.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

V. V. Petrov*

Postgraduate Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5173-4279>

Department of Building Architecture and Design

Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, 24 Pershotravnevyi Avenue, Poltava, Ukraine, 36011

*corresponding author, e-mail: peeterssonn@gmail.com

Modern structural systems for general secondary education institutions with protective structures: materials and technologies

How to Cite:

Petrov, V. V. (2026). Modern structural systems for general secondary education institutions with protective structures: materials and technologies. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 350-366. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-26)

Abstract. The article analyzes modern structural systems, materials and technologies used in the design of general secondary education institutions with built-in or attached civil defense protective structures. The relevance of the study is determined by the need to ensure continuity of the educational process under wartime threats in Ukraine, when a school building must combine educational and protective functions. The aim of the article is to identify structural solutions capable of ensuring safety, functional suitability, durability and further use of protective spaces in peacetime. The study applies comparative analysis of regulatory requirements, generalization of scientific publications, systematization of structural solutions and architectural-planning analysis of shelters within educational facilities. The expediency of using a cast-in-place reinforced concrete frame system as a basis for integrating protective structures into school buildings is substantiated, since it provides spatial rigidity, planning flexibility and reserve redistribution of forces. Special attention is given to the use of fiber-reinforced concrete and combined reinforcement in slabs, beams and frame joints that may be subjected to dynamic, impact and blast loads. The article analyzes the localization of progressive collapse, sealing of joints and utility penetrations, ventilation, autonomous life-support systems and natural lighting through tubular daylighting systems. The engineering and technological conditions required for the suitability of such spaces for prolonged occupancy are identified. It is established that the effectiveness of a school building with a protective structure depends on the coordination of the structural scheme, engineering equipment, planning logic and operational scenarios. An integrative approach is proposed, in which the shelter is considered a permanent element of educational infrastructure suitable for safe stay, learning activities and further adaptation.

Keywords: school buildings, protective structures, cast-in-place frame system, fiber-reinforced concrete, progressive collapse.

УДК 711.4:519.6

Л.М. Піліпака*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8067-4480>

Кафедра міського будівництва та господарства

Національний університет водного господарства та природокористування, вулиця Соборна, 11, Рівне, Україна, 33000

*автор-кореспондент, e-mail: l.m.pilipaka@nuwm.edu.ua

Метод скінченних міських модулів як інструмент моделювання та розрахунку містобудівних систем

Цитувати як:

Піліпака, Л.М. (2026) Метод скінченних міських модулів як інструмент моделювання та розрахунку містобудівних систем. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 25, 367-376. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-27](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-27)

© 2026, Автор. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті запропоновано метод скінченних міських модулів (МСкММ) – принципово новий гібридний підхід до математичного моделювання та розрахунку містобудівних систем, заснований на строгій адаптації апарату методу скінченних елементів (МСЕ) до задач просторового планування. Актуальність розробки зумовлена відсутністю уніфікованого математичного інструментарію, здатного одночасно описувати площинні міські зони, лінійні інфраструктурні мережі та точкові центри тяжіння в єдиній системі рівнянь із чітким трактуванням нормативних обмежень. Показано, що містобудівна система може бути подана через гібридний дискретний простір, де площинні міські модулі (квартали, райони, функціональні зони) описуються як 2D-елементи, транспортні та інженерні мережі – як 1D-елементи, а точкові об'єкти й агенти (центри тяжіння, зупинки, джерела попиту) – як 0D-елементи. Для кожного типу елемента виведено локальні оператори: матрицю жорсткості, матрицю накопичення та вектор навантаження із конкретною урбаністичною інтерпретацією коефіцієнтів (просторова провідність, пропускна здатність, цільність, попит). Запроваджено поняття матриці функціональної сумісності модулів, яка алгебраїзує містобудівний регламент та забезпечує математично коректне зв'язування суміжних міських зон – повна сумісність задає сильний інтерфейсний зв'язок, несумісність – бар'єрний елемент або нульовий зв'язок. Детально розглянуто блокову структуру глобальної системи рівнянь, типи граничних умов (Діріхле, Неймана, Робіна та сідові умови для задач з нормативними обмеженнями), а також методи розв'язання лінійних і нелінійних систем – ітераційні Крилов-методи, багаторівневі AMG-методи, прямі розвіджені розв'язувачі. Описано підходи до динамічного моделювання (IMEX-схеми для жорстких задач) та стохастичного аналізу (нейтрузивні та інтрузивні методи polynomial chaos). Проведено порівняльний аналіз МСкММ із клітинними

автоматами, агентно-орієнтованими та транспортними моделями, що підтвердив системні переваги запропонованого підходу: строга варіаційна постановка, адаптивна дискретизація, масштабовані розв'язувачі та природний зв'язок з чинними нормами. Продемонстровано відповідність МСкММ вимогам ДБН Б.2.2-12:2019 та практичну придатність методу для сценарного аналізу, оптимізаційних задач і автоматизованого картографування містобудівних індикаторів.

Ключові слова: метод скінченних елементів, містобудівне моделювання, просторове планування, доступність, гібридна дискретизація, сценарний аналіз.

Вступ

Сучасні містобудівні системи характеризуються значною складністю: вони включають взаємодіючі підсистеми транспорту, інженерної інфраструктури, землекористування, соціального середовища та екологічних факторів. Для обґрунтованого прийняття містобудівних рішень потрібен інструментарій, здатний одночасно описувати площинні міські зони, лінійні мережі та точкові центри тяжіння в єдиній математичній моделі [1].

Традиційні підходи, такі як клітинні автомати, агентно-орієнтовані моделі, транспортні чотирикрокові моделі, вирішують окремі аспекти задачі, проте кожен з них має обмеження: клітинні автомати добре відтворюють просторову дифузію, але не мають строгого математичного апарату для мережевих потоків; агентні моделі забезпечують поведінкову деталізацію, але погано масштабуються для великих систем; транспортні моделі враховують мережеву зв'язність, але ігнорують просторовий розподіл щільності та доступності [2, 3].

МСЕ, розроблений для задач механіки суцільних середовищ, пропонує потенційно уніфікований математичний апарат: строгу варіаційну постановку, локальне складання елементів у глобальну систему, чітке трактування граничних умов та наявність зрілих розв'язувачів [4]. Проте пряме перенесення класичного МСЕ на містобудівні задачі є некоректним через суттєво різну природу «жорсткості» та «переміщень» в урбаністичному контексті.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Аналіз наукових публікацій свідчить про значний інтерес дослідників до формалізації містобудівного моделювання. Wilson A.G. [5] заклав основи просторово-взаємодіючих моделей; Batty M. [6] розвинув підходи на базі клітинних автоматів та фракталів; Wegener M. [7] систематизував інтегровані моделі транспорту та землекористування. Однак більшість існуючих підходів або не мають строгого варіаційного формулювання, або

не дозволяють природно поєднувати елементи різної розмірності в єдиній системі рівнянь [8].

Проблема полягає у відсутності уніфікованого математичного апарату, який забезпечував би: (1) одночасний опис площинних, лінійних і точкових містобудівних об'єктів; (2) строгу алгебраїзацію містобудівного регламенту як граничних умов; (3) масштабовані методи розв'язання для великих міських систем; (4) природний зв'язок з чинною нормативною базою просторового планування [9].

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення та обґрунтування методу скінченних міських модулів (МСкММ) як математично строгого інструменту моделювання та розрахунку містобудівних систем.

Для досягнення мети вирішувалися такі завдання: формалізація гібридного дискретного простору містобудівної системи; виведення локальних операторів для елементів різної розмірності; побудова глобальної блокової системи рівнянь; визначення типів граничних умов відповідно до нормативних вимог; порівняльний аналіз МСкММ з існуючими методами моделювання.

Матеріали та методи

Методологічну основу МСкММ становить апарат методу кінцевих елементів, адаптований до специфіки містобудівних задач. Містобудівна система подається гібридним доменом:

$$\Omega = \Omega_c \cup \Gamma_n \cup \Xi_a \quad (1)$$

де $\Omega_c \subset \mathbb{R}^2$ – площинна частина міста (ареальні модулі); Γ_n – вбудована 1D-мережа (транспортні, енергетичні та водні зв'язки); Ξ_a – множина точкових об'єктів, агентів та центрів тяжіння [10].

Вектор стану системи має блокову структуру $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m, \lambda\}$, де блоки u_i відповідають підсистемам (мобільність, інфраструктура, житло, екологія, соціальні індикатори), а λ – двоїстим змінним сумісності. Узагальнена напівдискретна постановка задачі:

$$M(U) \cdot \dot{U} + R(U, t, \omega) = F(t, \omega) \quad (2)$$

де M – матриця накопичення (інерції), R – нелінійний оператор просторового зв'язку, перерозподілу та обмежень, F – вектор екзогенних впливів, ω – стохастичний параметр сценарію. Для квазістатичних задач отримуємо $R(U) = F$.

Для клітинного 2D-елемента локальний оператор жорсткості та вектор навантаження визначаються як:

$$K_{e\ cell} = \int \Omega_e B_e^T D_e B_e d\Omega + \int \Omega_e N_e^T \Sigma_e N_e d\Omega \quad (3)$$

де D_e – тензор просторової провідності або взаємопроникності між сусідніми модулями; Σ_e – матриця локальних втрат та насичення; N_e – матриця базисних функцій; $B_e = \nabla N_e$ – матриця градієнтів [4].

Для мережевого 1D-елемента на ребрі довжини ℓ_e симетрична частина матриці жорсткості:

$$K_{e,symnet} = (k_e / \ell_e) \cdot [[1, -1], [-1, 1]] \quad (4)$$

де k_e – коефіцієнт пропускної здатності (аналог провідності для дороги, трубопроводу чи лінії зв'язку). Напрявлений член β_e робить матрицю несиметричною для мереж з орієнтованими потоками [4].

Матриця функціональної сумісності модулів C_{ijmod} алгебраїзує містобудівний регламент через інтерфейсний оператор:

$$a_{ijint}(u_i, u_j; v) = \int \Gamma_{ij} \gamma_{ij}(u_i - u_j) \cdot v \, d\Gamma, \quad \gamma_{ij} = \gamma_0 \cdot \chi(C_{ijmod}) \quad (5)$$

де γ_0 – базова інтенсивність зв'язку; $\chi(C_{ijmod})$ – функція, що відображає ступінь функціональної сумісності: повна сумісність означає сильний дозволений зв'язок, умовна – послаблений, несумісність – нульовий зв'язок або бар'єрний елемент [9].

МІСТОБУДІВНА СИСТЕМА		
2D-елементи Клітинні модулі <i>Квартали, райони, зони</i>	1D-елементи Мережеві елементи <i>Вулиці, мережі, комунікації</i>	0D-елементи Агентні вузли <i>Центри тяжіння, агенти</i>
ГЛОБАЛЬНА СИСТЕМА РІВНЯНЬ: $A \cdot U = F$ Матриця жорсткості · Вектор стану = Вектор навантаження		
ВИХОДИ: Карти доступності Індикатори сервісу	ОБМЕЖЕННЯ: ДБН, зонування Бюджет, екологія	СЦЕНАРНИЙ АНАЛІЗ: Детерміновані Стохастичні

Рис. 1. Концептуальна схема методу скінченних міських модулів (МСкММ)

Результати та обговорення

Розроблений МСкММ забезпечує єдиний математичний опис містобудівної системи через гібридний дискретний простір $V_h = V_{hcell} \times V_{hnet} \times V_{hagent} \times \Lambda_h$. Така архітектура дозволяє природно включати в модель містобудівні норми (ДБН Б.2.2-12:2019) як граничні умови: умови типу Діріхле, які задають фіксовані цільові стани або допустимі рівні сервісу; умови Неймана, які задають потоки та імпорту/експорту між зонами; умови Робіна, які задають напівпроникні межі та тарифно-часові опори; сідлові зв'язки для регламентів сумісності [5, 9].

Таблиця 1. Типи елементів методу скінченних міських модулів

Тип елемента	Геометрія та масштаб	Ступені свободи	Оцінка ефективності
Клітинний (2D)	Площинні полігони: квартали, райони; вузли: вершини та межові інтерфейси	Щільність, потенціал доступності, екологічне навантаження, площинні потоки	Висока для розподілених полів; добра масштабованість
Мережевий (1D)	Ребра: канали, вулиці; вузли: перехрестя, станції, хаби	Вузлові потенціали, лінійні потоки, пропускна здатність, імпеданс	Дуже висока для коридорів і мереж; низькі ресурси
Агентний (0D)	Точкові об'єкти, прикріплені до клітин або вузлів мережі	Попит, вибір маршруту, графік активності, поведінкові стани	Висока для гетерогенності; середня масштабованість
Гібридний (2D+1D+0D)	Комбінація всіх типів з єдиною картою DOF	Блокові комбінації всіх вищезазначених DOF	Найвища для реалістичного міста; потребує блокового розв'язувача

Розроблений МСкММ забезпечує єдиний математичний опис містобудівної системи через гібридний дискретний простір $V_h = V_{hcell} \times V_{hnet} \times V_{hagent} \times \Lambda_h$. Така архітектура дозволяє природно включати в модель містобудівні норми (ДБН Б.2.2-12:2019) як граничні умови: умови типу Діріхле задають фіксовані цільові стани або допустимі рівні сервісу; умови Неймана – задані потоки та імпорту/експорту між зонами; умови Робіна – напівпроникні межі та тарифно-часові опори; сідлові зв'язки – регламенти сумісності [5, 9].

Принципова перевага МСкММ полягає у можливості одночасного моделювання полів розвитку (щільність, доступність, екологічне навантаження) через клітинні елементи та потоків (транспортні, інженерні) через мережеві елементи в рамках однієї блокової матриці. Позадіагональні блоки глобальної матриці відображають фізичні зв'язки

між підсистемами: транспорт ↔ щільність, інфраструктура ↔ якість середовища, доступність ↔ соціальні індикатори [6, 7].

Важливою характеристикою МСкММ є адаптивність масштабу дискретизації. Згідно з принципами методу, елементи доцільно подрібнювати у зонах підвищеної функціональної складності: вузлах пересадки, лікарнях, берегових захисних зонах, «вузьких місцях» мережі, – і укрупнювати в однорідних житлових та промислових кварталах. Цей підхід аналогічний адаптивному рефайнменту сітки у класичному МКЕ і забезпечує раціональне використання обчислювальних ресурсів [8, 10].

Стохастичний аналіз у МСкММ реалізується двома способами. Неінтрузивний підхід передбачає багаторазові детерміновані розрахунки для ансамблю сценаріїв ($E[\Phi(U)] \approx (1/N_s) \sum \Phi(U_s)$). Інтрузивний підхід – стохастичний Гальоркін / polynomial chaos – збільшує алгебраїчний розмір системи до $N_{dof} \times N_s$, але забезпечує формальну оцінку невизначеності. Для задач просторового планування неінтрузивний підхід є доцільнішим через простоту інтеграції з існуючими нормативними сценаріями [3].

Постпроцесний аналіз у МСкММ передбачає обчислення містобудівних індикаторів $I_k = \Psi_k(U_h)$: карти доступності сервісів, hotspot-и щільності, agrow-карти потоків, часово-залежні карти зеленого доступу, shadow prices λ як міри інфраструктурного дефіциту та мапи локальної нев'язки для виявлення проблемних ділянок [1, 6].

Таблиця 2. Порівняння МСкММ з існуючими методами моделювання містобудівних систем

Метод	Основна парадигма	Масштабованість	Основна область застосування
МСкММ (запропонований)	Клітинно-мережева	Висока	Потоки, доступність, щільність
Клітинний автомат (CA)	Клітинна	Середня	Змінення землекористування
Агентне моделювання (ABM)	Агентна	Середня, низька	Поведінкові патерни
Транспортна чотирикорова	Мережева	Висока	Транспортні потоки

Порівняльний аналіз (таблиця 2) показує, що МСкММ поєднує переваги клітинно-автоматного підходу (просторова роздільна здатність),

мережевих моделей (опис потоків) та агентних моделей (поведінкова гетерогенність), водночас забезпечуючи математично строгу постановку, що відсутня в кожному з цих підходів окремо. Клітинні автомати та АВМ доцільно використовувати як верхній шар правил, що оновлює коефіцієнти та джерела між кроками МСкММ, а не як заміну варіаційного ядра [2, 3, 7].

Відповідність МСкММ чинній нормативній базі України забезпечується через природне відображення вимог ДБН у граничні умови моделі: нормативи щільності задаються як обмеження-нерівності; санітарні буферні зони як бар'єрні елементи з нульовим зв'язком; вимоги до пішоїдної доступності сервісів як умови Діріхле на вузлах доступності. Це дозволяє автоматично перевіряти нормативну відповідність проектних рішень у процесі розрахунку [9].

Висновки

Розроблений метод скінченних міських модулів (МСкММ) є математично строгим гібридним підходом до моделювання містобудівних систем, що поєднує апарат методу кінцевих елементів з особливостями урбаністичних задач. Основні результати:

1. Запропоновано гібридний дискретний простір $V_h = V_{hcell} \times V_{hnet} \times V_{hagent} \times \Lambda_h$, що забезпечує одночасний опис площинних міських зон (2D), транспортних та інженерних мереж (1D) і точкових агентів (0D) в єдиній матричній системі.

2. Виведено локальні оператори (матриці жорсткості, накопичення та вектори навантаження) для кожного типу елементів, а також інтерфейсний оператор матриці функціональної сумісності модулів, що алгебраїзує містобудівний регламент.

3. Показано, що містобудівні норми (зонування, щільність, буферні зони, доступність, бюджет) природно входять у модель як граничні умови типу Діріхле, Неймана, Робіна та сідлові зв'язки, забезпечуючи відповідність вимогам ДБН Б.2.2-12:2019.

4. Порівняльний аналіз підтвердив переваги МСкММ над існуючими підходами: строга варіаційна постановка, масштабовані розв'язувачі (Крилов-методи, AMG), природний зв'язок з нормативною базою та можливість сценарного і стохастичного аналізу.

5. Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію МСкММ на реальних містобудівних системах, розробку програмного інструментарію та інтеграцію з ГІС-даними та стандартом GTFS для часово-залежного транспортного моделювання.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що у нього немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший.

Фінансування

Дослідження проводилося без спеціального фінансування.

Доступність даних

Усі дані представлені в основному тексті статті у цифровій і графічній формах.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи технології штучного інтелекту не використовувалися.

References

1. Pourmohammadi M. R. System Thinking and System Analysis in Urban Planning. Biomedical Journal of Scientific & Technical Research. 2022. Vol. 45, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2022.45.007216>
2. Batty M. The New Science of Cities. Cambridge : MIT Press, 2013. 520 p. DOI: <https://doi.org/10.1257/jel.52.3.805>
3. Land use–transport interaction models / R. Cordera, A. Ibeas, L. dell'Olio, B. Alonso. Boca Raton : CRC Press, 2017. 238 p.
4. Bathe K. J. Finite element procedures. 2nd ed. United States : K. J. Bathe, 2014. 765 p.
5. Wilson A. G. Entropy in Urban and Regional Modelling. London : Pion, 1970. 166 p.
6. Batty M., Xie Y. From cells to cities. Environment and Planning B: Planning and Design. 1994. Vol. 21. P. 31–48. DOI: <https://doi.org/10.1068/b21s031>
7. Geurs K. T., van Wee B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. Journal of Transport Geography. 2004. Vol. 12, No. 2. P. 127–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>
8. Louf R., Barthelemy M. A typology of street patterns. Journal of the Royal Society Interface. 2014. Vol. 11, No. 101. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0924>
9. DBN B.2.2-12:2019. Planuvannia ta zabudova terytorii. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2019. 187 s.
10. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method / A. Logg, K.-A. Mardal, G. Wells (eds). Berlin: Springer, 2012. 728 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>

Література

3. Pourmohammadi M. R. System Thinking and System Analysis in Urban Planning. Biomedical Journal of Scientific & Technical Research. 2022. Vol. 45, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2022.45.007216>
4. Batty M. The New Science of Cities. Cambridge : MIT Press, 2013. 520 p. DOI: <https://doi.org/10.1257/jel.52.3.805>

3. Land use–transport interaction models / R. Cordera, A. Ibeas, L. dell’Olio, B. Alonso. Boca Raton : CRC Press, 2017. 238 p.
4. Bathe K. J. Finite element procedures. 2nd ed. United States : K. J. Bathe, 2014. 765 p.
5. Wilson A. G. Entropy in Urban and Regional Modelling. London : Pion, 1970. 166 p.
6. Batty M., Xie Y. From cells to cities. Environment and Planning B: Planning and Design. 1994. Vol. 21. P. 31–48. DOI: <https://doi.org/10.1068/b21s031>
7. Geurs K. T., van Wee B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. Journal of Transport Geography. 2004. Vol. 12, No. 2. P. 127–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>
8. Louf R., Barthelemy M. A typology of street patterns. Journal of the Royal Society Interface. 2014. Vol. 11, No. 101. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0924>
9. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. Київ : Мінеріон України, 2019. 187 с.
10. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method / A. Logg, K.-A. Mardal, G. Wells (eds). Berlin: Springer, 2012. 728 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 15.05.2026	Received 15.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2026	Received in revised form 23.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

L.M.Pilipaka*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8067-4480>
Department of Urban Planning and Development
National University of Water and Environmental Engineering, 11 Soborna St., Rivne, Ukraine, 33000

*corresponding author, e-mail: l.m.pilipaka@nuwm.edu.ua

Finite Urban Module Method as a Tool for Modelling and Calculation of Urban Planning Systems

How to Cite: Pilipaka L.M.. (2026) Finite Urban Module Method as a Tool for Modelling and Calculation of Urban Planning Systems. Modern technologies and methods of calculations in construction, 25, 367-376. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-27](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-27)

Abstract. The paper presents the Finite Urban Module Method (FUMM) – a fundamentally new hybrid approach to mathematical modelling and calculation of urban planning systems based on the rigorous adaptation of the finite element method (FEM) to spatial planning problems. The relevance of this work is driven by the absence of a unified mathematical framework capable of simultaneously describing planar urban

zones, linear infrastructure networks and point-based centres of gravity within a single system of equations with explicit handling of regulatory constraints. The urban system is represented through a hybrid discrete space in which planar urban modules (blocks, districts, functional zones) are described as 2D-elements, transport and engineering networks as 1D-elements, and point objects and agents (gravity centres, transit stops, demand sources) as 0D-elements. Local operators are derived for each element type: the stiffness matrix, the accumulation matrix and the load vector, with explicit urban interpretation of the coefficients (spatial conductivity, network capacity, density, demand). The concept of a functional module compatibility matrix is introduced to algebraize urban planning regulations and ensure mathematically rigorous coupling between adjacent urban zones: full compatibility implies a strong interface connection, incompatibility implies a barrier element or zero coupling. The block structure of the global system of equations is examined in detail, covering Dirichlet, Neumann, Robin and saddle-point boundary conditions for problems with regulatory constraints, as well as solution methods for linear and nonlinear systems including Krylov iterative methods, multilevel AMG solvers and direct sparse factorisation. Dynamic modelling via IMEX schemes for stiff problems and stochastic analysis via non-intrusive and intrusive polynomial chaos approaches are described. A comparative analysis of FUMM against cellular automata, agent-based and conventional transport models confirms the systematic advantages of the proposed approach: rigorous variational formulation, adaptive discretisation, scalable solvers and natural alignment with current regulatory standards. Compliance of FUMM with DBN B.2.2-12:2019 is demonstrated, and practical applicability for scenario analysis, optimisation tasks and automated urban indicator mapping is established.

Keywords: finite element method, urban modeling, spatial planning, accessibility, hybrid discretization, scenario analysis.

УДК 539.3

О. П. Єфімов

студент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5440-6207>

Кафедра будівельних і дорожніх машин

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002

Л. В. Гапонова

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6038-2624>

Кафедра комп'ютерної графіки

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: nagitator13@gmail.com

Алгоритмічна еволюція конструкцій та шлях від моноліту до біонічного дизайну через топологічну оптимізацію

Цитувати як:

Єфімов, О. П., Гапонова, Л. В. (2026). Алгоритмічна еволюція конструкцій та шлях від моноліту до біонічного дизайну через топологічну оптимізацію. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 377-385. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-28](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-28)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті представлено результати дослідження ефективності сучасних методів проектування будівельних конструкцій, зокрема технологій топологічної оптимізації та генеративного дизайну. Сьогодні галузь стикається з потребою знизити витрати металу, не ризикуючи при цьому стійкістю та довговічністю споруд. В умовах дефіциту сировини та жорстких екологічних вимог, перехід до раціонального розподілу матеріалів стає ключовим завданням для сучасної інженерної спільноти. Для порівняльного аналізу було обрано три різні типи конструкцій: стандартну суцільну сталеву балку, класичну ферму та інноваційну біонічну структуру, що імітує природні принципи формування опор. Весь цикл чисельного моделювання виконувався в середовищі Autodesk Fusion 360. Основний фокус дослідження спрямований на алгоритмічне проектування, де фінальна геометрія виникає не як суб'єктивне бачення інженера, а як прямий результат математичного розрахунку полів напружень. Проведені розрахунки довели, що біонічна модель, сформована через відсікання ненавантажених зон, забезпечує найбільш логічну передачу внутрішніх зусиль. Експериментальні дані підтвердили, що генеративний дизайн дозволяє полегшити конструкцію на цілих 80% відносно монолітного прототипу. При цьому важливо, що необхідний коефіцієнт запасу міцності зберігається в повному обсязі. Такі результати наочно демонструють, що відмова від масивних форм на користь складних алгоритмічних структур – це логічна еволюція інженерії в бік ресурсозбереження. Висновки дослідження мають цінність для проектування легких металоконструкцій нового

титу. Впровадження автоматизованих систем такого рівня в освітній процес та реальне виробництво дозволить не лише зекономити на матеріалах і логістиці, а й закласти фундамент для екологічно стійкого будівництва, де кожна деталь працює на межі своїх фізичних можливостей.

Ключові слова: топологічна оптимізація, генеративний дизайн, метод скінченних елементів, фермові конструкції, вага, міцність, розвиток.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У сучасному будівництві та машинобудуванні однією з ключових проблем є пошук балансу між масою конструкції та її міцністю. Надлишкова вага не лише призводить до підвищення бюджету на проект, а й до негативного впливу на навколишнє середовище через підвищення викидів CO₂ при виробництві металу. Зараз для перекриття великих прольотів зазвичай використовують фермові конструкції, які здатні зменшити використання металу на 30-50% порівняно зі звичайними балками. Проте класичні розрахунки фермових конструкцій часто залишають великий запас матеріалу, який не використовується ефективно.

Сьогодні в сучасному розвитку інженерії найперспективнішим шляхом оптимізації конструкції є топологічна оптимізація та генеративний дизайн. В основі цих методів лежить математичний підхід, що реалізований за допомогою комп'ютерних алгоритмів, та дозволяє перерозподілити або прибрати матеріал для забезпечення найвищої міцності при мінімальній вазі. Серед існуючих підходів найпопулярнішим є SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), який розбиває об'єкт на сітку скінченних елементів (рис. 1). Підґрунтям методу SIMP є використання закону штрафування жорсткості. Це необхідно, бо пряма робота зі значеннями 0 або 1 створює обчислювальне навантаження, тому вводиться параметр відносної щільності ρ_i , де 1 відповідає суцільному матеріалу, а 0 – порожнечі:

$$E_i = \rho_i^p * E_0$$

У даному рівнянні через E_i ми позначаємо модуль Юнга окремого елемента, тоді як E_0 відображає показник усієї конструкції на виході. Через ρ_i ми позначаємо щільність елемента, а p (зазвичай $p = 3$) допомагає алгоритму приймати значення лише 0 або 1, і елементи з низькою щільністю стають невідгідними для системи через низьку жорсткість при великій вазі, тому алгоритм прибирає проміжні значення з фінального результату. Але без фільтрації після алгоритму фінальний результат мав би вигляд точок, які не мають зв'язку між собою. Фільтр аналізує щільність сусідніх елементів і з'єднує їх у цілісну та гладку структуру. Саме завдяки такому математичному аналізу ми отримуємо складні

біонічні структури, які візуально нагадують природні об'єкти, але є результатом суворого відбору.

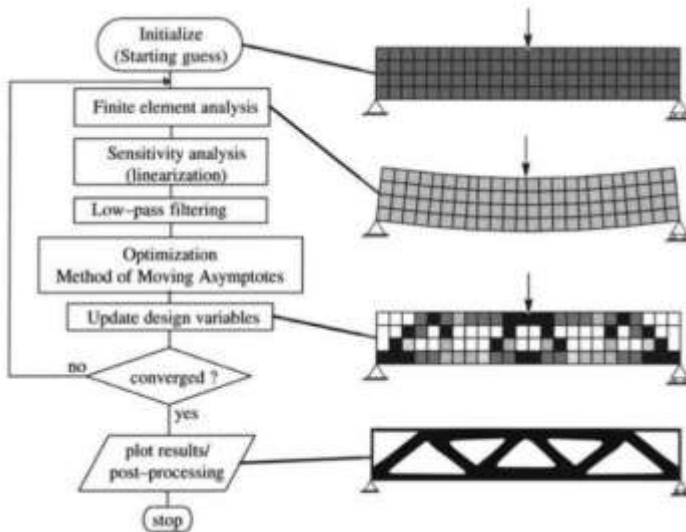


Рис. 1. Алгоритм оптимізації топології методом розподілу матеріалу з використанням MMA [1]

Важливо не плутати топологічну оптимізацію з генеративним дизайном. Хоча вони і мають спільну мету – мінімізація ваги та оптимізація форми за допомогою алгоритмів, топологічна оптимізація має фокус на видаленні зайвого матеріалу з уже існуючої форми. Натомість генеративний дизайн здатний створювати сотні варіантів конструкцій з нуля, спираючись лише на задані цілі та обмеження. Це дає інженерам та дизайнерам можливість обирати найкращий варіант за балансом ваги, міцності та естетики.

Реальні кейси в індустрії лише підтверджують, наскільки ефективним може бути подібний підхід. До прикладу, бразильський стартап None Structures [2] під супроводом Маркоса Сільвейра розпочав роботу над створенням пішохідного моста, використовуючи методи алгоритмів для оптимізації залізобетонних конструкцій. Алгоритм аналізує навантаження та відсікає бетон у зонах, які не працюють. Це дозволило створити балку, яка потребує на 45% менше матеріалу порівняно зі стандартними методами. Складні біонічні форми таких конструкцій реалізуються за допомогою 3D-друку, що не тільки зберігає матеріал, а й знижує викиди CO₂. Виконано чисельний експеримент поведінки конструктивно-анізотропних конструкцій при впливі на них рівномірно-

розподіленого 1600 Па/м^2 та зосередженого навантаження 1 т/м^2 . Для вивчення напружено-деформованого стану елементів запропоновано безпечний простір у вигляді конструктивно-анізотропної оболонки розміром $9 \text{ м} \times 9 \text{ м}$ з кроком бетонних ребер 1 м з полістирольними вкладишами та конструктивно-анізотропна оболонка розміром $9 \text{ м} \times 9 \text{ м}$ з металевим листом у нижньому поясі [3, 4, 5].

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є порівняльний аналіз напружено-деформованого стану суцільної металевої балки, традиційної фермової конструкції та фермової конструкції, змодельованої з використанням топологічного аналізу, для підтвердження ефективності зниження ваги без втрати несучої здатності.

Матеріали та методи

Для проведення порівняльного аналізу та верифікації ефективності топологічної оптимізації було обрано метод чисельного моделювання (FEA) у середовищі Autodesk Fusion 360 [6].

В межах чисельного експерименту ми порівнювали три типи конструкцій: спочатку суцільна сталева балка, потім стандартна ферма та наостанок її оптимізований варіант. Усі три типи конструкцій мають однакові розміри – $1200 \times 200 \times 25 \text{ мм}$. Для трьох моделей було призначено матеріал Steel (Сталь), вибір якої обумовлений її стабільними характеристиками, зокрема модуль Юнга у 210 ГПа , коефіцієнт Пуассона у $0,30$ та межа текучості у 207 МПа .

Для створення реалістичних умов роботи конструкції було застосовано такі параметри симуляції:

1. Тип кріплення: жорстке защемлення (Fixed) лівої торцевої грані конструкції та для стабільності чисельного розрахунку, до правої торцевої грані застосовано тип кріплення Frictionless. Це дозволило обмежити обертальне переміщення конструкції, при цьому зберігаючи можливість вільного ковзання вздовж правої осі, що відповідає умовам роботи реальних опорних вузлів;
2. Навантаження прикладалося рівномірно-розподілене: сила величиною 5000 Н (510 кг), прикладена перпендикулярно до верхньої площини. Також враховано дію власної ваги конструкції для підвищення точності розрахунків.

Результати та обговорення

На першому етапі було проведено статичний аналіз сталевий балки. Результати показали, що при заданому навантаженні конструкція має критично високий запас міцності $18,9$ одиниць, що свідчить про значну перевитрату матеріалу. Поля розподілу напружень (рис. 2) демонструють,

що центральна частина балки практично не сприймає навантаження, залишаючись у темно-синій та світло-синій зонах низьких напружень.

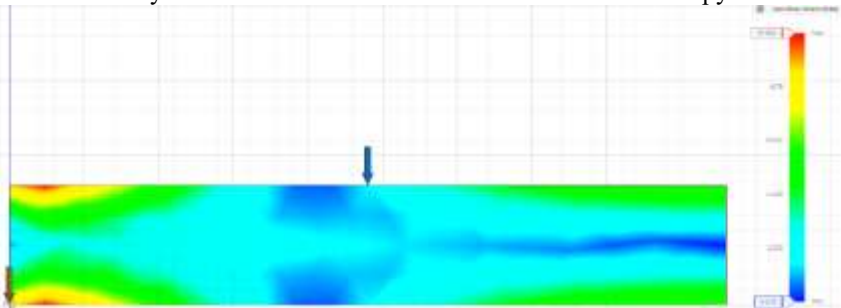


Рис. 2. Розподіл напружень у суцільній балці, маса 47,1 кг (сформовано авторами у програмному комплексі Autodesk Fusion 360)

На другому етапі була змодельована класична фермова конструкція. Вона повторює габарити першої моделі, але замість суцільного заповнення має решітчасту структуру. Поля розподілу напружень (рис. 3) демонструють, що конструкція працює набагато ефективніше, ніж суцільна балка. Аналіз результатів фермової моделі показав наступне: запас міцності знизився до значення 3,0. Це є оптимальним показником для сталевих конструкцій у будівництві, що забезпечує надійність без зайвої металомісткості. Максимальний прогин збільшився лише на 0,5 мм порівняно з сталевією балкою, що є несуттєвим для конструкції такої довжини. Маса конструкції зменшилася з 47,1 кг до 10,1 кг.

На третьому етапі ми застосували Generative Design. Головна відмінність від класичного підходу полягає в тому, що алгоритм зробив біонічну геометрію внутрішніх стержнів самостійно. При збереженні тієї ж рами, вага знизилася до 9,6 кг, а от запас міцності, навпаки, піднявся до 3,7. Це прямий доказ того, що цифрові алгоритми знаходять значно ефективніші геометричні форми, ніж це можливо при традиційному ручному проектуванні.

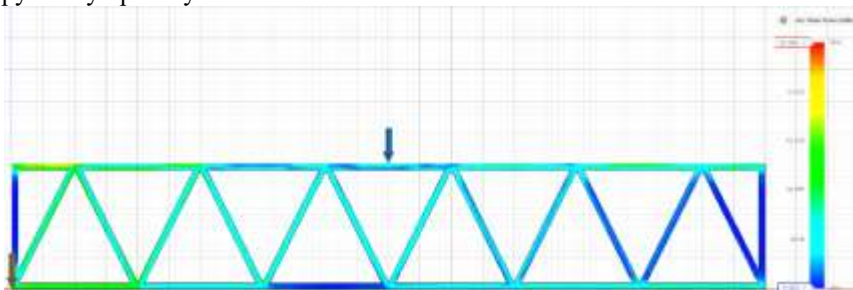


Рис. 3. Розподіл напружень у класичній фермовій конструкції, маса 10,1 кг (сформовано авторами у програмному комплексі Autodesk Fusion 360)

Власне, такий підхід дає змогу отримати конструкцію, де кожен грам металу працює в максимально напруженому режимі. Програма просто вичистила матеріал із зон з нульовим навантаженням, перекинувши його туди, де він критично необхідний для цілісності структури (рис. 4). На графіку ми бачимо переважання зеленого кольору – це показник того, що матеріал завантажений оптимально. Цікаво, що асиметрія деталі, яку ми бачимо на візуалізації, пояснюється фізикою – основний потік енергії йде до лівої опори, тому алгоритм логічно посилив саме цю ділянку.

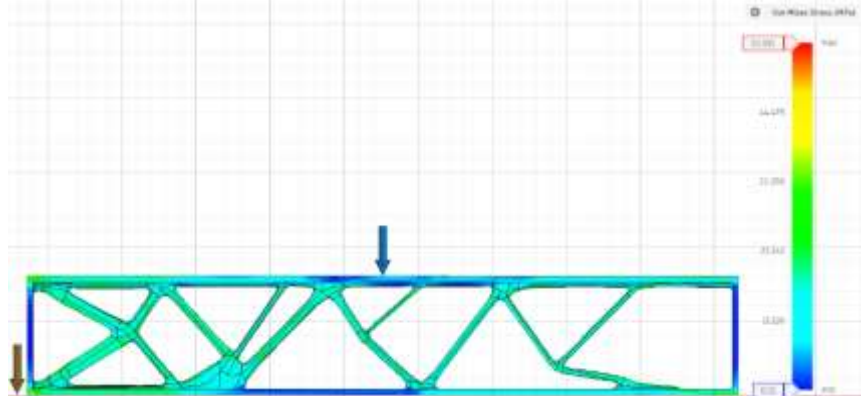


Рис 4. Розподіл напружень у біонічній фермовій конструкції, створеної за допомогою комп'ютерних алгоритмів, маса 9,6 кг (сформовано авторами у програмному комплексі Autodesk Fusion 360)

Для наочності порівняння основних параметрів результати зведено у таблицю 1.

Таблиця 1. Порівняльні характеристики моделей

Показник	Суцільна балка	Традиційна ферма	Оптимізована ферма	Ефект
Маса, кг	47,1	10,1	9,6	-79,6%
Запас міцності	18,9	3,0	3,7	-80,4%
Макс. зміщення, мм	0,1	0,6	0,46	+78,2%

Висновки

Підбиваючи підсумки, проведений аналіз наочно ілюструє неминучий перехід від громіздких монолітних рішень до принципів інтелектуального проектування. Практика показує, що використання суцільних балок під великим навантаженням – це неякісно та неефективно. Понад 70% металу там просто не працює в зонах низьких напружень, створюючи зайвий баласт для опор. Натомість впровадження класичної ферми дало колосальний стрибок. Ми зменшили масу з 47,1 кг до 10,1 кг. Це економія майже 78% матеріалу при стабільному запасі міцності. Такий результат лише підкреслює, що геометрія в інженерії важливіша за тонни металу. Проте справжній прорив забезпечують саме алгоритми топологічної оптимізації. Навіть при малих масштабах комп'ютер зміг знизити вагу з 10,1 кг до 9,6 кг, а міцність водночас підскочила до 3,7. Окрім чистої економіки, ми маємо й екологічний наслідок. Зниження ваги на 70-80% автоматично тягне за собою менші викиди CO₂ та легшу логістику. Для України в майбутній відбудові використання таких методів – це реальний шанс будувати швидше, дешевше та надійніше.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

(Або вказати офіційні вихідні дані теми державної науково-дослідної роботи, гранту тощо)

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Bendsoe M. P., Sigmund O. (2013) Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. 5-14. <https://books.google.com.ua/books?id=ZCjsCAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
2. Turney D. (2020) Concrete sustainability improves with generative design. Autodesk Articles. <https://www.autodesk.com/design-make/articles/sustainable-concrete>

3. Gaponova, L. V., Arkhipov, O. V., & Suminov, A. V. (2025). Computer modeling of anisotropic shells in "AUTODESK INVENTOR" software. Bulletin of Kharkiv National Highway University. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.218>

4. Bugaievskiy, S. O., Gaponova, L. V., Nazarko, O. O., & Bugaievskiy, V. O. (2024). History of bridge architecture until the 18th century. Bulletin of Kharkiv National Highway University. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.100>

5. Aleksandrovych, V. A., Havryliuk, O. V., Atinian, A. O., Pustovoitova, O. M., & Gaponova, L. V. (2025). Influence of dynamic load parameters on the deformation of the soil base. Bulletin of Kharkiv National Highway University. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.105>

6. Autodesk Fusion 360: Integrated CAD, CAM, CAE, and PCB software. Official website. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

Література

1. Bendsoe M. P., Sigmund O. (2013) Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. 5-14. <https://books.google.com.ua/books?id=ZCjsCAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

2. Turney D. (2020) Concrete sustainability improves with generative design. Autodesk Articles. <https://www.autodesk.com/design-make/articles/sustainable-concrete>

3. Гапонова Л. В., Архіпов О. В., Сумінов А. В. Комп'ютерне моделювання анізотопних оболонок у ПК «AUTODESK INVENTOR». <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.218>

4. Бугаєвський С. О., Гапонова Л. В., Назарько О. О., Бугаєвський В. О. Історія архітектури мостів до XVIII століття. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.100>

5. Александрович В. А., Гаврилюк О. В., Атинян А. О., Пустовойтова О. М., Гапонова Л. В. Вплив параметрів динамічного навантаження на деформацію ґрунтової основи. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.105>

6. Autodesk Fusion 360. Integrated CAD, CAM, CAE, and PCB software. Official website. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.05.2026	Received 14.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2026	Received in revised form 23.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. P. Yefimov

Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5440-6207>

Department of Construction and Road Machines

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho St., Kharkiv, Ukraine, 61002

L. V. Gaponova

PhD. in Technical Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Department of Computer Graphics

*corresponding author, e-mail: nagitator13@gmail.com

Algorithmic evolution of structures from monoliths to bionic design via topology optimization

How to Cite:

Yefimov, O. P., Gaponova. (2026). Algorithmic evolution of structures from monoliths to bionic design via topological optimization. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 377-385. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-28](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-28)

Abstract. The article presents the results of advanced digital design methods, focusing on topology optimization and generative design within the construction industry. Currently, the sector faces a critical challenge – achieving a significant reduction in metal consumption without compromising the stability or durability of structures. In an era of resource scarcity and stringent environmental regulations, shifting toward the rational distribution of materials has become a primary objective for the engineering community. For the comparative analysis, three distinct structural configurations were selected: a standard solid steel beam, a conventional truss, and an innovative bionic structure that mimics natural load-bearing principles. The entire numerical modeling cycle was conducted using the Autodesk Fusion 360 environment. The core focus of the study is directed at algorithmic design – a process where the final geometry emerges not from an engineer’s subjective vision, but as a direct result of the mathematical calculation of stress fields. The performed calculations demonstrated that the bionic model, shaped by stripping away non-loaded zones, ensures the most logical transfer of internal forces. Experimental data confirmed that generative design allows for a structural weight reduction of up to 80% compared to the monolithic prototype. Crucially, the required safety factor remains fully intact. Furthermore, the study highlights that such weight optimization directly correlates with a reduced carbon footprint, as less raw material extraction and energy-intensive smelting are required. These results clearly illustrate that moving away from massive forms in favor of complex algorithmic structures represents a logical evolution of engineering toward resource efficiency. The integration of these geometries with additive manufacturing (3D printing) further expands the horizons of architectural freedom. The study’s findings hold direct practical value for the design of next-generation lightweight metal structures. Implementing such high-level automated systems into educational programs and industrial workflows will not only save on materials and logistics but also lay the foundation for sustainable construction where every component operates at its physical limit. Ultimately, this approach transforms the structural engineer from a traditional draughtsman into a curator of algorithmic processes.

Keywords: topological optimization, generative design, Finite Element Analysis, truss structures, weight, strength, development.

УДК 691.32:620.197

О. О. Горюн*

PhD, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-835X>

Кафедра інженерних систем у будівництві

Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21000

*автор-кореспондент, e-mail: oleggoriun@vntu.edu.ua

Перспективи застосування імпульсної технології для модифікації бетонних і цементних виробів

Цитувати як:

Горюн, О. О. (2026). Перспективи застосування імпульсної технології для модифікації бетонних і цементних виробів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 386-400. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-29](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-29)

© 2026, Автор. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розглянуто перспективи застосування імпульсної технології для модифікації будівельних матеріалів та виробів на цементній основі з метою підвищення їх експлуатаційної надійності та довговічності. Проведено аналітичний огляд сучасних підходів до поверхневої та об'ємної модифікації бетонів і цементних композитів, спрямованих на зниження водопоглинання, підвищення морозостійкості, зносостійкості та опору дії агресивних середовищ. Особливу увагу приділено технології імпульсного імпрегнування як перспективному способу інтенсифікації проникнення модифікуючих рідин у пористу структуру матеріалу. Розглянуто принцип дії технології, що базується на створенні імпульсів тиску, які забезпечують більш глибоке та рівномірне просочення поверхневого шару бетонних виробів порівняно з традиційними методами.

Визначено основні напрями можливого практичного застосування технології у виробництві тротуарної плитки, дорожньо-будівельних елементів, фасадних конструкцій, промислових підлог, а також при ремонті та реконструкції існуючих бетонних і залізобетонних споруд. Показано, що використання імпульсного просочення сприяє зменшенню проникності структури матеріалу, підвищенню його водонепроникності та стійкості до циклічного заморожування і відтавання. Окремо розглянуто перспективи застосування технології для відновлення поверхневого шару експлуатованих конструкцій з ознаками деградації.

На основі аналізу наукових публікацій і власних попередніх досліджень автора обґрунтовано доцільність подальшого розвитку цього напрямку, зокрема в частині оптимізації режимів імпульсного впливу, підбору складу імпрегнуючих рідин та оцінки довготривалої ефективності модифікації. Результати аналітичного дослідження можуть бути використані як теоретична основа для

подальших експериментальних досліджень та впровадження технології у практику виробництва будівельних виробів.

Ключові слова: імпульсне імпрегнування, модифікація бетону, будівельні матеріали, морозостійкість, довговічність, поверхневе просочення.

Вступ

Одним із актуальних напрямів підвищення довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій є застосування методів модифікації поверхневого шару матеріалу. У сучасних дослідженнях розглядаються різні підходи до підвищення водонепроникності, морозостійкості та зносостійкості бетону, серед яких особливе місце займають поверхневе та об'ємне просочення, зокрема полімерне імпрегнування та гідрофобна обробка [1-3].

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Аналіз сучасних наукових праць свідчить, що одним із найбільш поширених підходів до підвищення довговічності бетонних і цементних матеріалів є використання поверхневого та об'ємного просочення. Значна увага приділяється полімерному імпрегнуванню бетону як способу підвищення його довговічності. Зокрема, у роботах [3, 4] наведено результати досліджень, які підтверджують, що полімерно-імпрегнований бетон характеризується підвищеною стійкістю до дії агресивних середовищ, циклів заморожування-відтавання та корозійних впливів, а також зниженим водопоглинанням. Такі властивості є особливо важливими для конструкцій, що експлуатуються в складних кліматичних і виробничих умовах.

Встановлено, що особливо ефективними є полімерні та силанові композиції, які забезпечують зниження проникності порової структури бетону та покращення його бар'єрних властивостей. Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням гідрофобних просочень, які суттєво знижують коефіцієнт капілярного всмоктування та підвищують стійкість матеріалу до проникнення хлоридів і вологи [5, 6].

Крім того, сучасні дослідження демонструють ефективність складів глибокого проникнення, що забезпечують додаткове ущільнення поверхневого шару бетону та сприяють підвищенню його довговічності. У роботі [2] показано позитивний вплив просочувальних герметизуючих складів на зменшення проникності та покращення експлуатаційних характеристик матеріалу.

Іншим важливим напрямом сучасних досліджень є просочення вторинних бетонних заповнювачів та рециклінгових матеріалів. У роботах [7-9] показано, що попереднє імпрегнування вторинного заповнювача, зокрема з використанням складів на основі лимонної кислоти, дозволяє

знижити його водопоглинання, покращити адгезію з цементним каменем та підвищити фізико-механічні властивості результуючого бетону.

Разом із тим, незважаючи на значну кількість праць, присвячених просоченню бетонів, питання систематизації перспектив застосування саме імпульсної технології для бетонних і залізобетонних виробів та конструкцій залишаються недостатньо висвітленими. У науковій літературі відсутнє цілісне узагальнення можливостей використання цієї технології для дорожніх, фасадних та відновлювальних конструкцій.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналітичне обґрунтування перспектив застосування імпульсної технології для модифікації будівельних матеріалів та виробів, а також визначення найбільш перспективних напрямів її практичного використання в будівництві. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати сучасні підходи до модифікації та поверхневого просочення бетонних матеріалів; охарактеризувати принцип дії імпульсної технології імпрегнування; визначити можливі сфери застосування технології у виробництві та реконструкції будівельних конструкцій; оцінити очікуваний вплив технології на фізико-механічні та експлуатаційні властивості матеріалів; окреслити перспективні напрями подальших експериментальних досліджень.

Матеріали та методи

Методикою дослідження передбачено проведення аналітичного огляду сучасних наукових публікацій, присвячених модифікації бетонних та цементних композитів шляхом поверхневого, об'ємного, в тому числі імпульсного просочення. За інформаційну базу використано результати вітчизняних і закордонних досліджень, представлених у наукових статтях, матеріалах конференцій та попередніх роботах автора, зокрема положеннях дисертаційного дослідження.

У роботі застосовано методи системного аналізу, порівняння, класифікації та аналітичного узагальнення. На першому етапі виконано відбір релевантних наукових джерел за тематикою підвищення довговічності бетонних виробів шляхом імпрегнування. На другому етапі проведено групування результатів за основними напрямками практичного застосування технології: гідротехнічне та водогосподарське будівництво, транспортна інфраструктура (дорожні, аеродромні та залізничні конструкції), фасадні та архітектурно-декоративні елементи, фундаментні й цокольні конструкції, огороджувальні елементи, а також сучасні спеціалізовані напрями. Схема методології дослідження наведена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема методології дослідження

Результати та обговорення

Аналітичне узагальнення принципу дії та потенціалу технології

Проведений аналіз наукових джерел та попередніх досліджень автора [10, 11] свідчить, що імпульсна технологія імпрегнування має суттєвий потенціал для підвищення експлуатаційних характеристик бетонних виробів. На рис. 2 представлено спрощену діаграму реалізації способу імпульсного імпрегнування.

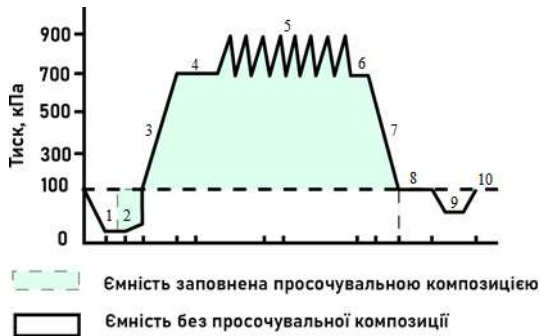


Рис. 2. Діаграма способу імпульсного імпрегнування виробів із бетону [10]: 1 - вакуумування, 2 - заповнення робочої камери просочувальною рідиною, 3 - створення надлишкового тиску, 4 - витримка під тиском, 5 - режим імпульсів тиску рідини, 6 - стабілізація тиску рідини, 7 - зниження тиску до атмосферного, 8 - злив просочувальної рідини, 9 - вакуумування, 10 - відновлення атмосферного тиску та розгерметизація

Для реалізації імпульсного режиму імпрегнування може бути використане спеціалізоване автоклавне устаткування, доповнене генератором імпульсів тиску. На рис. 3 наведено адаптовану принципову схему імпрегнатора імпульсної дії. Особливістю такої установки є можливість створення короткочасних імпульсів надлишкового тиску в робочій камері, що сприяє інтенсифікації проникнення просочувальної рідини у капілярно-пористу структуру бетону.

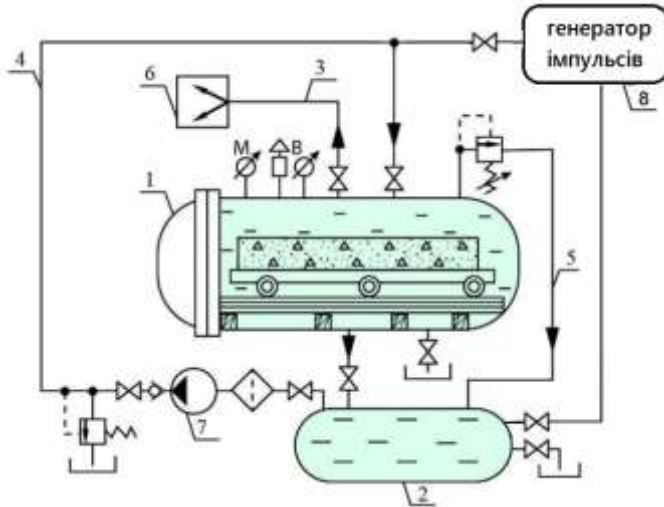


Рис. 3. Принципова схема імпрегнатора імпульсної дії:

- 1 - просочувальна камера; 2 - ємність з імпрегнантом; 3 - вакуумна лінія; 4 - лінія нагнітання імпрегнанта; 5 – зливна лінія; 6 - вакуумний насос; 7 - рідинний насос; 8 - генератор імпульсів тиску

На відміну від поверхневого та традиційного об'ємного просочення, об'ємне імпрегнування з імпульсним режимом забезпечує циклічну зміну величини надлишкового тиску, що сприяє більш глибокому проникненню та рівномірному розподілу модифікуючого складу в капілярно-пористій структурі цементного каменю. За рахунок цього досягається зниження відкритої пористості, зменшення водопоглинання, підвищення морозостійкості та стійкості до дії агресивних середовищ. Узагальнення результатів попередніх досліджень показує, що саме інтенсифікація проникнення просочувальної рідини є ключовою перевагою даної технології.

Класифікація перспективних напрямів

Гідротехнічне та водогосподарське будівництво. Одним із найбільш перспективних напрямів застосування імпульсної технології модифікації є

бетонні та залізобетонні конструкції, що експлуатуються в умовах постійного або періодичного контакту з водою. До таких виробів належать хвилерізи, причальні плити, укуси та підпірні стінки набережних, облицювальні плити каналів, бетонні водовідвідні лотки, безнапірні водопропускні труби, а також елементи зливової та дренажної мережі. За даними сучасних досліджень [12], основною причиною деградації таких конструкцій є проникнення хлорид-іонів, що викликає корозію арматури та зниження довговічності споруд. Основною перевагою імпрегнованих виробів є зменшення водопоглинання та підвищення стійкості до проникнення хлоридів і агресивних середовищ, що здебільшого обумовлено застосуванням силанового просочення [13]. Це особливо важливо для прибережних споруд та систем водовідведення.

Транспортна інфраструктура. Перспективною сферою застосування імпульсної технології імпрегнування є об'єкти транспортної інфраструктури, що експлуатуються в екстремальних умовах: за інтенсивних механічних навантажень, постійної дії вологи та агресивного впливу протижелезних реагентів. Використання полімерного просочення дозволяє суттєво підвищити корозійну стійкість бетону та його опірність циклам заморожування-відтавання [4], що є критичним для забезпечення довговічності конструкцій у змінних температурно-вологісних [14]. У межах галузі доцільно виділити три ключові сегменти: дорожнє будівництво, аеродрому та залізничну інфраструктуру.

У сегменті дорожнього будівництва та благоустрою об'єктами імпрегнування є вироби різного функціонального призначення та масштабу — від великогабаритних плит до дрібноштучних елементів мощення. Це можуть бути дорожні плити, різноманітні фігурні елементи мощення (зокрема тротуарної плитки, плит паркувальних майданчиків, зупинок громадського транспорту), бордюрний камінь. Основною проблемою тут є швидка втрата естетичного вигляду та структурної цілісності поверхні через сольову корозію та абразивне стирання під дією транспортних потоків та повторюваність циклів заморожування-відтавання [4, 14].

Особливої уваги потребує аеродромна інфраструктура, зокрема збірні покриття з підвищеною тримкістю: аеродромні плити (ПАГ), елементи руліжних доріжок, місць стоянок літаків та ремонтні плити для злітно-посадкових смуг. Аналіз стану існуючих аеродромних покриттів свідчить про їх схильність до інтенсивного тріщиноутворення, руйнування внаслідок загазованості, а також хімічного впливу [15]. Такі вироби потерпають від термічних ударів двигунів та екстремальних динамічних навантажень під час зльоту й посадки, що вимагає впровадження інноваційних рішень для підвищення їх експлуатаційних характеристик та

екологічної стійкості [16]. Світовий досвід управління станом покриттів у найбільших аеропортах світу підтверджує, що саме превентивні заходи із забезпечення довговічності бетону є запорукою сталого функціонування об'єктів [17].

Для залізничної сфери, що охоплює бетонні шпали, плити переїздів та водовідвідні системи, критичним фактором є вібраційна витривалість та стійкість до розтріскування в умовах постійного зволоження.

Фасадні та архітектурно-декоративні елементи. Окремим перспективним напрямом є захист виробів з архітектурного бетону, для яких критично важливою є стійкість до атмосферної ерозії та збереження естетичного вигляду. Об'єктами імпульсної обробки тут виступають фасадні та декоративні панелі, парпетні плити, накривки на паркани, карнизні елементи, балюстради, підвіконні плити, а також декоративні тумби та колони. Основною проблемою експлуатації таких елементів є висока гігроскопічність, коли накопичення вологи в порах призводить до появи висолів, розвитку мікрофлори (моху та грибка) і руйнування фактурного шару через температурні коливання. Використання імпульсного просочення дозволяє створити стійкий гідрофобний бар'єр, що сприяє ефекту самоочищення та запобігає проникненню забруднень углиб структури бетону.

Фундаментні та цокольні елементи. Технологія імпульсного імпрегнування є технічно обґрунтованою для конструкцій, що перебувають у постійному контакті з ґрунтовою вологою та підземними водами. До цієї групи відносяться збірні блоки фундаментів (ФБС), підпірні стінки, фундаментні стакани, цокольні панелі та елементи підвальних приміщень. Головним деструктивним чинником для таких об'єктів є капілярне підсмоктування вологи, що спричиняє корозію арматури та зниження теплоізоляційних властивостей бетону. Дослідження підтверджують, що просочення бетону розчинами силікату натрію за спеціальними технологіями дозволяє знизити водопоглинання більш ніж у 1,5 рази та підвищити міцність на стиск, що критично важливо для підземних конструкцій [18]. Створення щільного імпрегнованого шару суттєво знижує дифузійну проникність матеріалу, що дозволяє мінімізувати ризики руйнування в зонах змінного рівня ґрунтових вод та підвищити загальну довговічність підземних частин будівель.

Огороджувальні конструкції. Важливе значення має захист елементів збірних огорож, які піддаються комплексному впливу опадів, вітрових навантажень та циклічного заморожування. Об'єктами захисту є секції бетонних парканів, стовпи огорож, а також добірні елементи — накривки стовпів та парпетні кришки. Найбільш вразливими в таких конструкціях є горизонтальні поверхні та зони кріплень. Глибоке

імпульсне імпрегнування дозволяє герметизувати мікротріщини та монтажні вузли, запобігаючи відшаровуванню бетону та забезпечуючи стабільність геометричних форм елементів протягом тривалого терміну експлуатації. На основі проведеного аналітичного узагальнення запропоновано класифікацію перспективних напрямів застосування імпульсної технології залежно від умов експлуатації та очікуваного ефекту модифікації (табл. 1).

Таблиця 1. Перспективні напрями застосування імпульсної технології

Напрямок	Типові вироботи	Основний деструктивний чинник	Очікуваний ефект	Перспективний тип імпрегнантів
гідротехніка	лотки, канали, труби	вода, хлориди	водонепроникність	силанові, полімерні
дорожні покриття	ФЕМ, бордюри	Цикли заморожування-відтавання, реагенти	морозостійкість	гідрофобні
аеродроми	ПАГ, ЗПС	динамічні навантаження	зносо-стійкість	полімерні
фасади	панелі, парапети	опади, висоли	довговічність	гідрофобні
фундаменти	ФБС, підпірні стіни	грунтова волога	зниження проникності	силікатні

Сучасні спеціалізовані напрямки. Розвиток технологій модифікування структури бетону відкриває нові можливості для застосування імпрегнування у роботі з високотехнологічними композитами. Зокрема, сучасні дослідження [19] підтверджують ефективність просочувальних складів для покращення експлуатаційних характеристик текстильно-армованого бетону, що свідчить про універсальність методу не лише для традиційних, а й для тонкостінних високоміцних конструкцій. Інноваційним вектором є розробка спеціалізованих імпрегнуючих агентів з айс-фобними властивостями [20], які дозволяють суттєво знизити льодоутворення та водопоглинання дорожніх покриттів. Окрім покращення фізико-механічних властивостей, технологія імпрегнування дозволяє вирішувати екологічні завдання, наприклад, шляхом використання промислових відходів, зокрема сірчанних [21], як модифікуючих агентів для легких бетонів, що значно підвищує

їхню міцність та хімічну стійкість. Окремим перспективним напрямом є використання модифікуючих складів для ревіталізації бетонних об'єктів після термічного або тривалого експлуатаційного пошкодження. Такий підхід є доцільним при реконструкції фасадних елементів, балконних плит та мостових конструкцій, де відбулося локальне руйнування поверхневого шару або втрата структурної цілісності внаслідок дії вогню. Дослідження [22] показали, що імпрегнування пошкодженого бетону має потенціал для відновлення експлуатаційних показників. Це особливо важливо для захисту арматури від проникнення хлорид-іонів, які інтенсивно мігрують у структуру матеріалу як у прибережних зонах, так і в умовах дорожнього будівництва внаслідок масованого використання протижелезних реагентів. Своєчасна імпульсна обробка відновлюваних поверхонь створює надійний антикорозійний бар'єр, що суттєво подовжує термін служби відремонтованих споруд.

Техніко-економічні аспекти застосування

Підвищення довговічності бетонних виробів за рахунок імпульсного імпрегнування потенційно дозволяє зменшити витрати на ремонт, технічне обслуговування та передчасну заміну конструкцій.

За рахунок зниження проникності, водопоглинання та інтенсивності деградаційних процесів технологія може бути перспективною для виробів, експлуатація яких супроводжується дією вологи, циклів заморожування-відтавання та агресивних середовищ.

На відміну від існуючих досліджень, які переважно присвячені окремим видам імпрегнуючих складів або локальним аспектам модифікації бетонів, у даній роботі виконано систематизацію перспективних напрямів застосування саме імпульсної технології імпрегнування для різних типів бетонних та цементних виробів. Запропоновано класифікацію сфер практичного використання технології залежно від умов експлуатації конструкцій, домінуючих деструктивних чинників та очікуваного експлуатаційного ефекту. Це дозволяє розглядати імпульсне імпрегнування не лише як окремий спосіб модифікації матеріалу, а як перспективний універсальний технологічний підхід для підвищення довговічності будівельних виробів різного функціонального призначення.

Висновки

У роботі виконано аналітичне обґрунтування перспектив застосування імпульсної технології для модифікації будівельних матеріалів та виробів. На основі аналізу сучасних наукових джерел та попередніх досліджень автора встановлено, що використання імпульсного режиму імпрегнування забезпечує більш глибоке проникнення

модифікуючих складів у капілярно-пористу структуру цементного каменю, що сприяє зниженню водопоглинання, підвищенню морозостійкості та стійкості до дії агресивних середовищ.

У результаті аналітичного узагальнення запропоновано класифікацію перспективних напрямів застосування імпульсної технології залежно від типу конструкцій, умов експлуатації та домінуючих деструктивних чинників.

Встановлено, що найбільш доцільним є застосування імпульсного імпрегнування для конструкцій, які працюють в умовах інтенсивного зволоження, циклічного заморожування-відтавання, дії хлоридів та значних механічних навантажень. До таких об'єктів належать споруди гідротехнічного та водогосподарського будівництва, транспортної інфраструктури, фасадні та архітектурно-декоративні елементи, фундаментні та цокольні конструкції, а також бетонні споруди, що перебувають в експлуатації й потребують відновлення поверхневого шару.

Перспективою подальших досліджень є експериментальне визначення оптимальних режимів імпульсного впливу, глибини проникнення модифікуючих складів та кількісна оцінка змін фізико-механічних властивостей бетонних виробів.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що у нього немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи він не використовував технології штучного інтелекту.

References

1. Thissen, P., Bogner, A., & Dehn, F. (2024). Surface treatments on concrete: An overview on organic, inorganic and nano-based coatings and an outlook about surface modification by rare-earth oxides. *RSC Sustainability*, 2(8), 2092-2124. <https://doi.org/10.1039/d3su00482a>
2. Huang, K., Cheng, A., Tseng, Y. T., Lin, Y., Zhang, Y., & Cheng, P. C. (2025). Effect of Concrete Deep Penetration Sealer on Durability of Concrete. *Materials Science Forum*, 1163, 131-135. <https://doi.org/10.4028/p-5cnqxe>

3. Kumar, R. & Narayanan, R. (2020). A review on polymer impregnated concrete using steel wire mesh. *Materials Today: Proceedings*, 33(1), 338-344, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.118>
4. Mostofinejad, D., Bahmani, H., Khorshidifar, A., & Afsharpour, R. (2024) Enhancing concrete durability with polymer impregnation: A comparative study of corrosion and freeze-thaw resistance. *Developments in the Built Environment*, 18, 100414, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100414>
5. Zhang, P., Shang, H., Hou, D., Guo, S., & Zhao, T. (2017). The effect of water repellent surface impregnation on durability of cement-based materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article 8260103. <https://doi.org/10.1155/2017/8260103>
6. Sohawon, H. & Beushausen, H. (2019). The effect of hydrophobic impregnation on chloride ingress into cracked concrete. *IABSE Congress: The Evolving Metropolis, New York, NY, USA, 4-6 September 2019, published in The Evolving Metropolis, 1963-1970* <https://doi.org/10.2749/newyork.2019.1963>
7. Jaskulski, R., Reiterman, P., Kubissa, W., & Yakymchko, Y. (2021). Influence of Impregnation of Recycled Concrete Aggregate on the Selected Properties of Concrete. *Materials*, 14, 4611. <https://doi.org/10.3390/ma14164611>
8. Jaskulski, R., Kubissa, W., & Yakymchko, Y. (2023) Influence of Citric Acid-Assisted Impregnation of Recycled Aggregate on the Properties of the Resultant Concrete. *Materials*, 16, 2986. <https://doi.org/10.3390/ma16082986>
9. Wang, J., Wu, M., Zhou, H., Juan Du, R. M., et al. (2024). Nano-modified recycled aggregates via vacuum impregnation: Towards stronger and durable recycled concrete, *Journal of Building Engineering*, 94, 110006, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110006>
10. Horiun, O. O. (2024). Modification of concrete construction products using technology and equipment for pulse impregnation: *dissertation ... of the degree of Doctor of Philosophy*. Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University. https://ida.vntu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/11/dis_Horiun-O.O.-2.pdf
11. Horiun, O. O. (2024). Hydrophobization of building products using equipment for cyclic hydrothermal saturation. *Modern technologies, materials and structures in construction*, 36(1), 58-63. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-58-63>
12. Li, K., Han, J., Wang, S., Lian, H., Xiong, J., et. al. (2023). Long-term performance of structural concretes in China southeast coastal environments exposed to atmosphere and chlorides, *Cement and Concrete Research*, 164, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107064>
13. Zewei, D., Xiaodong, W., & Ming, Z. (2024). Research progress of silane impregnation and its effectiveness in coastal concrete structures: A review, *Journal of Building Engineering*, 91, 109550, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109550>
14. Zeng, Y., Zhang, D., Dai, J., Fang, M. & Jin, W. (2020). Determining the service life extension of silane treated concrete structures: A probabilistic approach, *Construction and Building Materials*, 249, 118802, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118802>

15. Horiun, O. O. (2019). Analytical study of the condition of existing asphalt and cement concrete airfield pavements. *Modern technologies, materials and structures in construction*, 26(1), 38-42. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-38-42>
16. Zaidan, O. A. (2026). Enhancing airport concrete pavement performance and sustainability in the United Arab Emirates (*Doctoral thesis, Heriot-Watt University*). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32832.90883>
17. Greer, W., Kuchikulla, S., & Drinkard, J. (2025). Pavement Management: Key to Sustainable Concrete Pavement at the World's Busiest Airport. *Proceedings of the International Conference on Concrete Pavements*, 364-377 <https://doi.org/10.33593/iccp.v10i1.386>
18. Shumakov, I., Miroshnikov, V., Younis, B., Buhaievskiy, S., & Bratishko, S. (2024). Improvement of concrete parameters by the method of Sodium Silicates impregnation by internal vacuum tamping. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012031>
19. Pires de Paula, P., Silva, R., & Silva, F. (2025). The effect of different impregnation materials on the performance and application of carbon textile reinforced concrete (TRC). In *66° Congresso Brasileiro do Concreto (CBC2025), Curitiba, Paraná*.
20. Lukpanov, R., Kabdyrova, L., Dyusseminov, D., & Tsigulyov, D. (2026). Ice-Phobic Keratin-Polymer Impregnation for Concrete Pavements: Performance, Adhesion, and Durability Assessment. *Infrastructures*, 11(4), 113. <https://doi.org/10.3390/infrastructures11040113>
21. Isakulov, B., Abdullaev, H., Tukashev, Z., Issakulov, A., & Sundetova, A. (2025). Increasing the performance of lightweight concrete by impregnation with sulfur waste. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 183-191. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003809>
22. Li, Z., Kitada, T. (2024). Performance Recovery of Fire-damaged Concrete by Impregnation of NaOH-added Lithium Silicate. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 22(12), 751-768, <https://doi.org/10.3151/jact.22.751>

Література

1. Thissen, P., Bogner, A., & Dehn, F. (2024). Surface treatments on concrete: An overview on organic, inorganic and nano-based coatings and an outlook about surface modification by rare-earth oxides. *RSC Sustainability*, 2(8), 2092-2124. <https://doi.org/10.1039/d3su00482a>
2. Huang, K., Cheng, A., Tseng, Y. T., Lin, Y., Zhang, Y., & Cheng, P. C. (2025). Effect of Concrete Deep Penetration Sealer on Durability of Concrete. *Materials Science Forum*, 1163, 131-135. <https://doi.org/10.4028/p-5cnqx6>
3. Kumar, R. & Narayanan, R. (2020). A review on polymer impregnated concrete using steel wire mesh. *Materials Today: Proceedings*, 33(1), 338-344, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.118>
4. Mostofinejad, D., Bahmani, H., Khorshidifar, A., & Afsharpour, R. (2024) Enhancing concrete durability with polymer impregnation: A comparative study of corrosion and freeze-thaw resistance. *Developments in the Built Environment*, 18, 100414, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100414>
5. Zhang, P., Shang, H., Hou, D., Guo, S., & Zhao, T. (2017). The effect of water repellent surface impregnation on durability of cement-based materials. *Advances in*

6. Sohawon, H. & Beushausen, H. (2019). The effect of hydrophobic impregnation on chloride ingress into cracked concrete. *IABSE Congress: The Evolving Metropolis, New York, NY, USA, 4-6 September 2019, published in The Evolving Metropolis, 1963-1970* <https://doi.org/10.2749/newyork.2019.1963>

7. Jaskulski, R., Reiterman, P., Kubissa, W., & Yakymchko, Y. (2021). Influence of Impregnation of Recycled Concrete Aggregate on the Selected Properties of Concrete. *Materials*, 14, 4611. <https://doi.org/10.3390/ma14164611>

8. Jaskulski, R., Kubissa, W., & Yakymchko, Y. (2023) Influence of Citric Acid-Assisted Impregnation of Recycled Aggregate on the Properties of the Resultant Concrete. *Materials*, 16, 2986. <https://doi.org/10.3390/ma16082986>

9. Wang, J., Wu, M., Zhou, H., Juan Du, R. M., et al. (2024). Nano-modified recycled aggregates via vacuum impregnation: Towards stronger and durable recycled concrete, *Journal of Building Engineering*, 94, 110006, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110006>

10. Горюн, О. О. (2024). Модифікація будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування: дис. ... д-ра філософії. Вінниця: Вінницький національний технічний університет. https://ida.vntu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/11/dis_Horiun-O.O.-2.pdf

11. Горюн, О. О. (2024). Гідрофобізація будівельних виробів з використанням устаткування для циклічного гідротермічного насичення. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 36(1), 58-63. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-58-63>

12. Li, K., Han, J., Wang, S., Lian, H., Xiong, J., et. al. (2023). Long-term performance of structural concretes in China southeast coastal environments exposed to atmosphere and chlorides, *Cement and Concrete Research*, 164, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107064>

13. Zewei, D., Xiaodong, W., & Ming, Z. (2024). Research progress of silane impregnation and its effectiveness in coastal concrete structures: A review, *Journal of Building Engineering*, 91, 109550, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109550>

14. Zeng, Y., Zhang, D., Dai, J., Fang, M. & Jin, W. (2020). Determining the service life extension of silane treated concrete structures: A probabilistic approach, *Construction and Building Materials*, 249, 118802, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118802>

15. Горюн, О. О. (2019). Аналітичне дослідження стану існуючих асфальто-та цементобетонних аеродромних покриттів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 26(1), 38-42. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-38-42>

16. Zaidan, O. A. (2026). Enhancing airport concrete pavement performance and sustainability in the United Arab Emirates (*Doctoral thesis, Heriot-Watt University*). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32832.90883>

17. Greer, W., Kuchikulla, S., & Drinkard, J. (2025). Pavement Management: Key to Sustainable Concrete Pavement at the World's Busiest Airport. *Proceedings of the International Conference on Concrete Pavements*, 364-377 <https://doi.org/10.33593/iccp.v10i1.386>

18. Shumakov, I., Miroshnikov, V., Younis, B., Buhaievskiy, S., & Bratishko, S. (2024). Improvement of concrete parameters by the method of Sodium Silicates impregnation by internal vacuum tamping. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012031>

19. Pires de Paula, P., Silva, R., & Silva, F. (2025). The effect of different impregnation materials on the performance and application of carbon textile reinforced concrete (TRC). In *66^o Congresso Brasileiro do Concreto (CBC2025)*, Curitiba, Paraná.

20. Lukpanov, R., Kabdyrova, L., Dyusseminov, D., & Tsigulyov, D. (2026). Ice-Phobic Keratin-Polymer Impregnation for Concrete Pavements: Performance, Adhesion, and Durability Assessment. *Infrastructures*, 11(4), 113. <https://doi.org/10.3390/infrastructures11040113>

21. Isakulov, B., Abdullaev, H., Tukashev, Z., Issakulov, A., & Sundetova, A. (2025). Increasing the performance of lightweight concrete by impregnation with sulfur waste. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 183-191. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003809>

22. Li, Z., Kitada, T. (2024). Performance Recovery of Fire-damaged Concrete by Impregnation of NaOH-added Lithium Silicate. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 22(12), 751-768, <https://doi.org/10.3151/jact.22.751>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 10.05.2026	Received 10.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 14.05.2025	Received in revised form 14.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. O. Horium

Ph.D., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-835X>

Department of Engineering Systems in Construction

Vinnitsia National Technical University, 95 Khmelnytskyi Highway, Vinnitsia, Ukraine, 21000

*corresponding author, e-mail: oleggorium@vntu.edu.ua

Prospects for the application of impulse technology for the modification of concrete and cement products

How to Cite:

Horium O. O. (2026). Prospects for the application of impulse technology for the modification of concrete and cement products. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 386-400. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-29](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-29)

Abstract. The article examines the prospects for the application of impulse technology in the modification of cement-based building materials and products in order to improve their operational reliability, durability, and long-term performance under various service conditions. The relevance of the study is determined by the growing need for advanced methods of enhancing the durability of concrete and reinforced concrete products exposed to moisture, cyclic temperature changes, aggressive chemical environments, and mechanical loading.

An analytical review of modern approaches to both surface and volumetric modification of concrete and cement-based composites is carried out, with particular attention focused on reducing water absorption, increasing frost resistance, wear resistance, corrosion resistance, and resistance to aggressive environmental factors. Special emphasis is placed on impulse impregnation technology as a promising method for intensifying the penetration of modifying liquids into the capillary-porous structure of cement stone and concrete products. In contrast to conventional methods of surface treatment and traditional bulk impregnation, the impulse mode provides cyclic variation of excess pressure, which significantly improves the depth and uniformity of the distribution of impregnating agents within the material structure.

The operating principle of the technology is considered based on the creation of short-term pressure impulses, which ensure deeper and more uniform impregnation of the surface and near-surface layers of concrete products compared to conventional methods. Due to the intensified penetration of hydrophobic, polymeric, silicate, or other modifying compositions, the technology contributes to the reduction of open porosity, capillary suction, and overall permeability of the material. As a result, improved resistance to moisture ingress, chloride penetration, freeze–thaw cycles, and surface degradation can be achieved.

The main directions of possible practical application of the technology are identified and systematized. These include the production of paving slabs, curbstones, road construction elements, airport pavement slabs, railway concrete products, hydraulic and water-management structures, façade and architectural decorative elements, industrial floors, foundation and basement components, as well as enclosing concrete structures. Particular attention is also paid to the prospects of applying the technology in the repair, reconstruction, and restoration of existing concrete and reinforced concrete structures that exhibit signs of degradation, including surface layer destruction, moisture damage, cracking, chloride-induced corrosion, and freeze–thaw deterioration.

The article also highlights the prospects for the use of impulse impregnation in specialized and innovative areas, including textile-reinforced concrete, lightweight concrete modified with industrial by-products, and the restoration of fire-damaged concrete structures. The analysis demonstrates that the implementation of impulse technology may significantly extend the service life of concrete products operating in severe environmental conditions.

Based on the analysis of scientific publications and the author's previous studies, the expediency of further development of this research area is substantiated, particularly in terms of optimizing impulse exposure parameters, selecting the most effective compositions of impregnating liquids, determining the depth of penetration, and assessing the long-term effectiveness of modification under real operating conditions. The results of the analytical study can be used as a theoretical and methodological basis for further experimental research and for the practical implementation of the technology in the industrial production of concrete and cement-based building products.

Keywords: impulse impregnation, concrete modification, building materials, frost resistance, durability, surface impregnation.

УДК 656.13:519.2

К. М. Березька*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9632-4004>

кафедра прикладної математики

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, вул. Львівська, 11, Україна, 46009

О. С. Шевчук

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8283-4620>

кафедра транспорту і логістики

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, вул. Львівська, 11, Україна, 46009

М. В. Буряк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5332-1498>

кафедра транспорту і логістики

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, вул. Львівська, 11, Україна, 46009

Ю. О. Рутецький

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3227-3874>

кафедра комп'ютерної інженерії

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, вул. Львівська, 11, Україна, 46009

*автор для листування, e-mail: km.berezka@gmail.com

Методика ранжування дорожніх сегментів міської мережі на основі показників завантаження та середньої швидкості в ранковий і вечірній піки

Цитувати як:

Березька, К. М., Шевчук, О. С., Буряк, М. В., Рутецький, Ю. О. (2026). Методика ранжування дорожніх сегментів міської мережі на основі показників завантаження та середньої швидкості в ранковий і вечірній піки. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 401-415. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-30](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-30)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розроблено методику розрахункової просторово-часової оцінки умов функціонування міської вулично-дорожньої мережі на рівні дорожніх сегментів. Вихідними даними є геопросторові показники інтенсивності завантаження та середньої швидкості руху в ранковий (AM) і вечірній (PM) періоди. Для забезпечення порівнянності результатів застосовано мін–макс нормування показників і сформовано інтегральний індекс конгестивності CI, який поєднує компоненти завантаження та швидкості в єдиній безрозмірній шкалі й дозволяє ранжувати сегменти за рівнем проблемності. Методика передбачає: підготовку єдиної аналітичної таблиці для сегментів; розрахунок CI окремо для AM та PM; визначення максимального значення CI_{max} як узагальненої характеристики пікової проблемності; оцінювання зміни умов руху між періодами за показником $\Delta CI = CI_{pm} - CI_{am}$. На основі CI_{am} , CI_{pm} та ΔCI виконується ранжування й виділення пріоритетних ділянок, що потребують першочергових організаційних або інфраструктурних заходів (оптимізація режимів регулювання,

удосконалення схем руху, локальні заходи підвищення пропускної здатності). Апробацію методики виконано на даних міської мережі (на прикладі м. Тернополя), що дало змогу сформувати перелік сегментів з найбільшими значеннями індексу конгестивності в АМ/РМ та визначити ділянки з найбільшим погіршенням транспортного режиму у вечірній період. Підхід є відтворюваним і може бути реалізований у середовищі ГІС та/або табличних процесорів для регулярного моніторингу, порівняння альтернативних схем організації руху та підготовки аналітичних матеріалів для проєктних рішень у міському будівництві. Отримані результати можуть бути використані як інженерно-аналітична основа для обґрунтування пріоритетів проєктних рішень і планування заходів з підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі.

Ключові слова: вулично-дорожня мережа; дорожні сегменти; інтенсивність завантаження; конгестивність; просторово-часовий аналіз

Вступ

Зростання рівня автомобілізації, зміни просторової структури міста та концентрація поїздок у пікові години формують стійку проблему заторів у міських вулично-дорожніх мережах. Перевантаження ключових ділянок призводить до зниження середніх швидкостей, збільшення часу поїздок, нерівномірного розподілу потоків та зростання витрат користувачів і міської економіки загалом. В умовах обмежених можливостей швидкого розширення інфраструктури особливої ваги набуває оперативна діагностика «вузьких місць» мережі та пріоритизація ділянок, де організаційні або локальні інфраструктурні заходи можуть забезпечити найбільший ефект. Такий підхід узгоджується з державними пріоритетами розвитку транспортної системи та потребами збалансованого просторового розвитку міст [1, 2].

Актуальність проблеми наочно проявляється на прикладі вулично-дорожньої мережі м. Тернополя, де транспортні потоки концентруються на магістральних коридорах і підходах до центральної частини міста, а також на ділянках, що забезпечують зв'язок між житловими районами та діловими й соціальними осередками. Для міста середнього розміру характерні обмежена ширина проїзної частини, наявність «пляшкових горлечок» біля мостів, перехресть і розв'язок, а також висока залежність пропускної здатності від режимів регулювання та геометрії підходів. У результаті навіть відносно невеликі зміни попиту в ранковий і вечірній пікові періоди можуть суттєво погіршувати умови руху на окремих сегментах мережі.

Проблема заторів тісно пов'язана з ефективністю пересування та якістю функціонування міської вулично-дорожньої мережі. Зміни швидкісного режиму та зростання рівня завантаження зумовлюють коливання часу поїздок у пікові години, що використовується в сучасних

практиках моніторингу як основа для оцінювання транспортних умов. Для міського управління та планування інфраструктурних рішень важливо одночасно враховувати два базові показники функціонування руху: завантаження та середню швидкість [3-5].

У практичних умовах дедалі частіше доступними стають просторові дані у вигляді картографічних шарів, що відображають завантаженість та швидкість на дорожніх сегментах у різні періоди доби (зокрема вранці та ввечері). Для м. Тернополя джерелом інформації можуть бути, зокрема, реєстри інтенсивності руху та завантаженості доріг у межах відкритих даних [6], а також сучасні цифрові сервіси та інструменти отримання показників швидкості й прив'язування до дорожньої мережі [7, 8]. Такі дані дають змогу не лише якісно описати проблемні коридори, а й кількісно порівнювати сегменти між собою: визначати ділянки з високим завантаженням і сегменти зі зниженням швидкості у пікові години.

У дослідженні використано характеристики транспортного режиму (інтенсивність завантаження та середня швидкість) як середні значення для ранкового та вечірнього пікових періодів (AM/PM). Це дає змогу виконати просторове порівняння сегментів мережі та сформуванати рейтинг проблемності як інженерно-аналітичну основу для пріоритизації організаційних і локальних інфраструктурних заходів.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Стаття є продовженням і розвитком прикладних досліджень, присвячених питанням модернізації транспортної інфраструктури середніх міст України та обґрунтуванню напрямів її удосконалення [9]. З огляду на нормативні вимоги до планування і забудови територій [1] та положення Національної транспортної стратегії України до 2030 року [2], для міст актуальною є задача підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі шляхом обґрунтованого вибору пріоритетних ділянок для втручань.

Окремий напрям прикладних досліджень в Україні пов'язаний із підвищенням ефективності транспортних систем міст через оптимізацію транспортних мереж та маршрутної організації перевезень; зокрема, на прикладі м. Черкаси продемонстровано можливості оптимізації мережі транспорту загального користування з урахуванням просторових обмежень і параметрів функціонування міської інфраструктури [10]. Це підтверджує актуальність інженерно-аналітичних підходів до оцінювання мережі та вибору пріоритетів удосконалення її елементів.

Методичні підходи до оцінювання умов руху та рівня обслуговування міських вулиць традиційно базуються на аналізі швидкості, інтенсивності, затримок та інших показників транспортного процесу. Узагальнені принципи оцінювання пропускнуої здатності та умов

руху для різних видів вулично-дорожніх елементів систематизовано у сучасних довідкових методиках, зокрема в Highway Capacity Manual [3]. У роботах оглядового характеру наведено систематизацію показників конгестивності та підходів до їх обчислення на основі даних спостережень, у тому числі даних, орієнтованих на швидкість та її зміну в часі [4]. Практичні приклади оцінювання конгестивності на основі даних рухомих спостережень (floating car data) для міських мереж наведені в [5], що підтверджує доцільність використання швидкості як ключового індикатора умов руху на сегментному рівні.

Окрім суто технічних показників умов руху (швидкість, завантаження, затримки), у літературі підкреслюється вплив конгестивності на якість пересування та “дискомфорт” користувачів транспортної системи, що опосередковано відображає соціально-економічну значущість зменшення перевантажень у пікові періоди [11].

У сучасних системах моніторингу широко застосовують індекси та агреговані метрики, які поєднують швидкість і завантаження для порівняння ділянок і визначення пікових перевантажень; прикладом є методичні підходи, представлені в аналітичних звітах і платформах оцінювання трафіку [8]. Додатково технічні інструменти отримання та прив’язування дорожніх атрибутів (зокрема показників швидкості та лінійної прив’язки) описані в документації відповідних API [7], що може бути використано при формуванні єдиного набору геопросторових даних для аналізу. Для локальних досліджень на рівні міста практичне значення мають також муніципальні відкриті дані, які містять реєстри інтенсивності руху та завантаженості доріг [6].

Таким чином, проблема полягає у необхідності відтвореної розрахункової методики, яка дозволяє уніфіковано порівнювати дорожні сегменти з різними масштабами показників у ранковий та вечірній пікові періоди, формувати інтегральний індикатор конгестивності та виконувати ранжування ділянок для обґрунтування пріоритетів організаційних і локальних інфраструктурних заходів. Саме на розв’язання цієї задачі й спрямоване дане дослідження.

Мета і завдання дослідження. Метою цієї роботи є порівняльний просторово-часовий аналіз дорожніх сегментів вулично-дорожньої мережі м. Тернополя за показниками завантаження та швидкості у ранковий і вечірній періоди. Для досягнення мети вирішуються такі завдання:

– сформувані єдиний набір даних для сегментів мережі з показниками середньої інтенсивності завантаження сегмента та середньої швидкості в AM/PM;

- порівняти ранковий та вечірній режими шляхом обчислення змін середньої інтенсивності завантаження сегмента та середньої швидкості та визначити сегменти з найбільш вираженими піковими ефектами;
- побудувати інтегральні індикатори проблемності руху, придатні для ранжування сегментів і виявлення “гарячих точок”.

Матеріали та методи

1. Вихідні дані та одиниця аналізу

Одиницею аналізу в роботі є дорожній сегмент (ділянка вулично-дорожньої мережі між суміжними вузлами/перехрестями), для якого наявні показники функціонування руху та безпеки. Для кожного сегмента $i = 1, \dots, n$ сформовано набір змінних:

- L_i^{am} , L_i^{pm} – середня інтенсивність завантаження сегмента у ранковий та вечірній періоди відповідно (у вихідній шкалі даних, наприклад 0–1);
- V_i^{am} , V_i^{pm} – середня швидкість руху на сегменті у ранковий та вечірній періоди (км/год).

2. Порівняння ранкового та вечірнього періодів

Для виявлення часових відмінностей між ранковим та вечірнім піковими режимами для кожного сегмента обчислено абсолютні та відносні зміни показників:

- абсолютна зміна завантаження:

$$\Delta L_i = L_i^{pm} - L_i^{am}. \quad (1)$$

- абсолютна зміна швидкості:

$$\Delta V_i = V_i^{pm} - V_i^{am}. \quad (2)$$

- відносні коефіцієнти “піковості”:

$$K_{L,i} = \frac{L_i^{pm}}{L_i^{am}}, \quad K_{V,i} = \frac{V_i^{pm}}{V_i^{am}}, \quad (3)$$

які дозволяють класифікувати сегменти за домінуючим періодом навантаження (вищі значення $K_{L,i}$ означають вищу завантаженість у РМ порівняно з АМ; аналогічно значення $K_{V,i}$ означають вищу швидкість у РМ порівняно з АМ для швидкості).

На рівні мережі (або її підмереж) виконано описове порівняння розподілів L^{am} проти L^{pm} та V^{am} проти V^{pm} (середні значення, медіани, мінімальне і максимальне значення), а також просторове зіставлення сегментів з найбільшими ΔL_i та найбільшим падінням швидкості ($\Delta V_i < 0$).

3. Нормування показників та формування індексу “конгестивності”

Для уніфікації порівнянь між сегментами та запобігання домінуванню показників з різними шкалами застосовано мін–макс нормування до інтервалу $[0;1]$. Для кожного періоду $t \in \{am, pm\}$:

– нормоване завантаження:

$$L_{i,t}^* = \frac{L_i^t - L_{\min}^t}{L_{\max}^t - L_{\min}^t}, \quad (4)$$

– нормована швидкість:

$$V_{i,t}^* = \frac{V_i^t - V_{\min}^t}{V_{\max}^t - V_{\min}^t}. \quad (5)$$

Оскільки зростання завантаження погіршує умови руху, а зростання швидкості – навпаки покращує, для швидкості використано інверсію $(1 - V_{i,t}^*)$ як показник “повільності”.

Для комплексної оцінки проблемності режиму руху на сегменті введено індекс конгестивності (CI):

$$CI_{i,t} = \alpha L_{i,t}^* + (1 - \alpha)(1 - V_{i,t}^*), \quad (6)$$

де $\alpha \in [0;1]$ – ваговий параметр. У дослідженні приймається $\alpha=0.5$, що забезпечує рівний внесок завантаження та швидкості. Значення $CI_{i,t}$ належать до $[0;1]$, де більші значення відповідають гіршим умовам руху (високе завантаження та/або низька швидкість [6–8, 20]).

На основі $CI_{i,am}$ та $CI_{i,pm}$ виконано ранжування сегментів для виділення “гарячих точок” у ранковий і вечірній періоди, а також аналіз переходу проблемності між періодами через $\Delta CI_i = CI_{i,pm} - CI_{i,am}$.

Результати та обговорення

На першому етапі було виконано порівняльний аналіз показників інтенсивності завантаження та середньої швидкості руху на дорожніх сегментах вулично-дорожньої мережі м. Тернополя у ранковий та вечірній періоди.

Отримані результати свідчать, що просторовий розподіл транспортного навантаження є нерівномірним: частина сегментів формує стійкі коридори підвищеного завантаження, тоді як інші ділянки характеризуються помірним або низьким навантаженням. Аналогічно, середні швидкості руху демонструють суттєву просторову варіацію, що

вказує на відмінності в умовах пропускної здатності, геометрії вулиць, режимах регулювання та інтенсивності конфліктних маневрів.

На рис. 1–2 наведено картографічну візуалізацію показників завантаження та швидкості у ранковий і вечірній періоди. На рис. 1 (а, б) показано просторовий розподіл інтенсивності завантаження сегментів мережі в АМ/РМ, а на рис. 2 (а, б) – просторовий розподіл середньої швидкості руху. Візуальний аналіз дозволяє виділити ділянки, для яких характерне поєднання високого завантаження та низької швидкості, що є ознакою несприятливого транспортного режиму.



а)



б)

Рис. 1. Картографічна візуалізація показників завантаження у ранковий (а) і вечірній (б) періоди



а)



б)

Рис. 2. Картографічна візуалізація показників швидкості у ранковий (а) і вечірній (б) періоди

Для кількісного порівняння ранкового та вечірнього періодів було обчислено зміни показників ΔL_i та ΔV_i . Це дало змогу ідентифікувати сегменти, на яких у вечірній період спостерігається посилення навантаження та/або зниження швидкості, а також сегменти зі зворотним

характером динаміки. Такий підхід є корисним для виявлення часово-специфічних “вузьких місць” міської мережі.

З метою інтегральної оцінки проблемності умов руху для кожного сегмента були розраховані значення індексу конгестивності CI_{am} та CI_{pm} , які враховують одночасно рівень завантаження та швидкість руху. Перевагою такого індексу є можливість порівнювати сегменти між собою в єдиній шкалі, незалежно від відмінностей у вихідних одиницях виміру показників.

Для наочного порівняння умов руху у ранковий та вечірній пікові періоди виконано картографічну візуалізацію значень індексу конгестивності CI_{am} та CI_{pm} (рис. 3). Для кожного дорожнього сегмента подано два числові значення, що відповідають ранковому та вечірньому пікам, що дозволяє безпосередньо зіставити зміну проблемності сегмента між періодами. Червоним кольором виділено сегменти, для яких хоча б в один із пікових періодів рівень конгестивності перевищує порогове значення 0,7. Така візуалізація забезпечує оперативне виявлення локальних «вузьких місць» мережі та сегментів підвищеної проблемності, які доцільно розглядати як пріоритетні для подальшого аналізу й інженерних заходів.

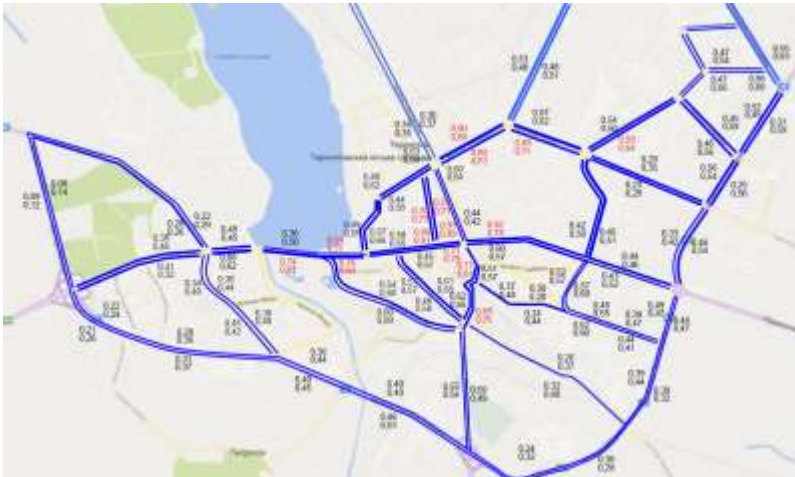


Рис. 3. Картографічна візуалізація індексу конгестивності дорожніх сегментів у ранковий та вечірній піки

У таблиці 1 наведено узагальнені статистичні характеристики показників завантаження, швидкості та індексу конгестивності для ранкового і вечірнього періодів.

У таблиці 2 подано перелік сегментів із критичними умовами руху, для яких CI^{max} перевищує порогове значення 0,7 (у ранковий та/або вечірній пікові періоди).

Таблиця 1. Описова статистика показників завантаження, швидкості та індексу конгестивності дорожніх сегментів у ранковий (AM) та вечірній (PM) періоди

Показник	Середнє	Медіана	Мін–макс
Інтенсивність завантаження, індекс (AM)	0,385	0,360	0,090–1,000
Інтенсивність завантаження, індекс (PM)	0,374	0,355	0,070–0,880
Середня швидкість, км/год (AM)	31,53	29,00	8–70
Середня швидкість, км/год (PM)	32,80	30,00	15–70
Індекс конгестивності (AM)	0,473	0,461	0,077–0,967
Індекс конгестивності (PM)	0,526	0,523	0,123–0,942

Таблиця 2. Сегменти з критичними умовами руху за індексом конгестивності ($CI^{max} > 0,7$)
 (показано CI_{am} , CI_{pm} , CI^{max} та період критичності)

Сегмент	CI_{am}	CI_{pm}	CI^{max}	Період критичності
міст техн. у-т (до центру)	0,967	0,892	0,967	AM і PM
вул. Тарнавського (від центру)	0,575	0,942	0,942	PM
вул. Збаразька (до центру)	0,903	0,882	0,903	AM і PM
вул. Торговиця (до ринку)	0,600	0,893	0,893	PM
вул. Збаразька (від центру)	0,802	0,826	0,826	AM і PM
вул. Бандери початок (до центру)	0,823	0,776	0,823	AM і PM
вул. Руська завершення (на захід)	0,661	0,812	0,812	PM
вул. Татарська (до ринку)	0,711	0,807	0,807	AM і PM
міст техн. у-т (від центру)	0,709	0,790	0,790	AM і PM
вул. Хмельницького	0,695	0,769	0,769	PM

(від вокзалу)				
вул. Руська початок (від центру)	0,641	0,769	0,769	PM
вул. Замонастирська (від ринку)	0,689	0,752	0,752	PM
вул. Замонастирська (до ринку)	0,623	0,751	0,751	PM
вул. Руська початок (до центру)	0,748	0,641	0,748	AM
ділянка біля озера (до центру)	0,744	0,571	0,744	AM
вул. Хмельницького (до вокзалу)	0,738	0,714	0,738	AM і PM
вул. Злуки початок (від центру)	0,493	0,708	0,708	PM

Примітка: $CI^{max} = \max(CI_{am}, CI_{pm})$.

Як видно з таблиці 2, критичні умови руху ($CI^{max} > 0,7$) зосереджені на обмеженій кількості сегментів. Для частини ділянок перевищення порога спостерігається в обох пікових періодах (AM і PM), тоді як для інших – лише у вечірній або лише у ранковий пік. Додатково, у таблиці 3 наведено сегменти з найбільшими змінами ΔCI між ранковим та вечірнім періодами, що дозволяє виділити ділянки з найбільш вираженим погіршенням або покращенням умов руху.

Таблиця 3. Сегменти з найбільшими змінами індексу конгестивності між ранковим та вечірнім періодами (ТОП-5 зростання та ТОП-5 зменшення $\Delta CI = CI_{pm} - CI_{am}$)

Тип зміни	Сегмент	CI_{am}	CI_{pm}	ΔCI
$\Delta CI > 0$ (PM > AM)	вул. Тарнавського (від центру)	0,575	0,942	0,367
$\Delta CI > 0$ (PM > AM)	вул. 15 квітня (середина) (від Східного)	0,248	0,555	0,306
$\Delta CI > 0$ (PM > AM)	вул. Торговиця (до ринку)	0,600	0,893	0,293
$\Delta CI > 0$ (PM > AM)	вул. 15 квітня (початок) (від Східного)	0,310	0,585	0,276
$\Delta CI > 0$ (PM > AM)	вул. Злуки початок (від центру)	0,493	0,708	0,215

$\Delta CI < 0$ (PM < AM)	ділянка біля озера (до центру)	0,744	0,571	-0,173
$\Delta CI < 0$ (PM < AM)	вул. Руська початок (до центру)	0,748	0,641	-0,107
$\Delta CI < 0$ (PM < AM)	вул. Монастирського (від Східного)	0,302	0,203	-0,098
$\Delta CI < 0$ (PM < AM)	вул. Микулинецька (до центру)	0,585	0,494	-0,091
$\Delta CI < 0$ (PM < AM)	вул. Бережанська (до центру)	0,405	0,322	-0,083

Висновки

1. За результатами аналізу геопросторових даних про завантаження та швидкість руху на 98 дорожніх сегментах вулично-дорожньої мережі м. Тернополя підтверджено просторову неоднорідність транспортного режиму в пікові години.

2. У середньому вечірній період характеризується більш несприятливими умовами руху, що відображається вищим середнім значенням індексу конгестивності у РМ порівняно з АМ.

3. Індекс конгестивності, сформований на основі нормованих показників завантаження та швидкості, є придатним для уніфікованого порівняння та ранжування сегментів і дозволяє виділяти стійко проблемні ділянки.

4. Індексні оцінки дозволили ідентифікувати сегменти, для яких рівень конгестивності перевищує порогове значення вранці або ввечері, та встановити ділянки зі значним погіршенням/покращенням умов руху у вечірній пік відносно ранкового.

5. Запропонована процедура інформаційної обробки даних (уніфікація, нормування, обчислення СІ та аналіз ΔCI) може використовуватись як інструмент швидкого скринінгу «вузьких місць» та формування пріоритетів для подальшого інженерного обстеження й оперативної оптимізації організації дорожнього руху, а також – для розробки заходів з реконструкції проїзної частини на дорожніх сегментах вулично-дорожньої мережі міст.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. DBN B.2.2-12:2019. (2019). Planuvannia ta zabudova terytorii [Planning and development of territories]. Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. https://dbn.co.ua/pay/pub01/dbn-B-2212_planuvannya.pdf
2. Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku [National transport strategy of Ukraine for the period up to 2030]. (2018). Cabinet of Ministers of Ukraine. https://publications.chamber.ua/2017/Infrastructure/UDD/National_Transport_St_rategy_2030.pdf
3. Transportation Research Board. (2022). Highway capacity manual (7th ed.): A guide for multimodal mobility analysis. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. <https://doi.org/10.17226/26432>
4. Afrin, T., & Yodo, N. (2020). A Survey of Road Traffic Congestion Measures towards a Sustainable and Resilient Transportation System. *Sustainability*, 12(11), 4660. <https://doi.org/10.3390/su12114660>
5. Kong, X., Xu, Z., Shen, G., Wang, J., Yang, Q., & Zhang, B. (2016). Urban traffic congestion estimation and prediction based on floating car trajectory data. *Future Generation Computer Systems*, 61, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.11.013>
6. Portal vidkrytykh danykh m. Ternopolia [Open data portal of Ternopil]. (n.d.). Reiestr intensyvnosti rukhu ta zavantazhenosti dorih [Register of traffic intensity and road congestion]. <https://ternopilcity.gov.ua/normative-documents/vidkriti-dani/>
7. Google. (n.d.). Speed limits | Roads API. Google Maps Platform. Retrieved March 24, 2026, from <https://developers.google.com/maps/documentation/roads/speed-limits>
8. TomTom. (2026). Traffic Index e-book: Methodological report. <https://www.tomtom.com/traffic-index/>
9. Shevchuk, O. S., Zakharchuk, O. P., Falovych, N. M., Berezka, K. M., & Siran, R. V. (2024). Kontseptualni osnovy modernizatsii transportnoi infrastruktury serednikh mist v Ukraini [Conceptual foundations for the modernization of transport infrastructure of medium-sized cities in Ukraine]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(22), 369–377. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1380>
10. Bilichenko, V. V., Tarandushka, L. A., Kostian, N. L., & Pylypenko, O. M. (2021). Optymizatsiia merezhi transportu zahalnoho korystuvannia na prykladi m. Cherkasy [Optimization of the public transport network on the example of Cherkasy]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 1(13), 13–22. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-13-22>

11. de Palma, A., Kilani, M., & Proost, S. (2015). Discomfort in mass transit and its implication for scheduling and pricing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 71, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.10.001>

Література

1. ДБН Б.2.2-12:2019. (2019). Планування та забудова територій. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. https://dbn.co.ua/pay/pub01/dbn-B-2212_planuvannya.pdf

2. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. (2018). Кабінет Міністрів України. https://publications.chamber.ua/2017/Infrastructure/UDD/National_Transport_Strategy_2030.pdf

3. Transportation Research Board. (2022). Highway capacity manual (7th ed.): A guide for multimodal mobility analysis. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. <https://doi.org/10.17226/26432>

4. Afrin, T., & Yodo, N. (2020). A Survey of Road Traffic Congestion Measures towards a Sustainable and Resilient Transportation System. *Sustainability*, 12(11), 4660. <https://doi.org/10.3390/su12114660>

5. Kong, X., Xu, Z., Shen, G., Wang, J., Yang, Q., & Zhang, B. (2016). Urban traffic congestion estimation and prediction based on floating car trajectory data. *Future Generation Computer Systems*, 61, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.11.013>

6. Портал відкритих даних м. Тернополя. (б. д.). Реєстр інтенсивності руху та завантаженості доріг. <https://ternopolcity.gov.ua/normative-documents/vidkriti-dani/>

7. Google. (n.d.). Speed limits | Roads API. Google Maps Platform. Retrieved March 24, 2026, from <https://developers.google.com/maps/documentation/roads/speed-limits>

8. TomTom. (2026). Traffic Index e-book: Methodological report. <https://www.tomtom.com/traffic-index/>

9. Шевчук, О. С., Захарчук, О. П., Фалович, Н. М., Березька, К. М., & Сіран, Р. В. (2024). Концептуальні основи модернізації транспортної інфраструктури середніх міст в Україні. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 1(22), 369–377. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1380>

10. Біліченко, В. В., Тарандушка, Л. А., Костьян, Н. Л., & Пилипенко, О. М. (2021). Оптимізація мережі транспорту загального користування на прикладі м. Черкаси. *Вісник машинобудування та транспорту*, 1(13), 13–22. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-13-22>

11. de Palma, A., Kilani, M., & Proost, S. (2015). Discomfort in mass transit and its implication for scheduling and pricing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 71, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.10.001>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.05.2026	Received 14.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 25.05.2025	Received in revised form 25.05.2025
Прийнято 27.05.2025	Accepted 27.05.2025
Опубліковано 29.05.2025	Published 29.05.2025

K. M. Berezka*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9632-4004>
Department of Applied Mathematics

West Ukrainian National University, Lvivska St., 11, Ternopil, Ukraine, 46009

O. S. Shevchuk,

PhD in Engineering, Associate Professor ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8283-4620>

Department of Transport and Logistics

Western Ukrainian National University, Lvivska St., 11, Ternopil, Ukraine, 46009

M. V. Buriak,

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5332-1498>

Department of Transport and Logistics

Western Ukrainian National University, Lvivska St., 11, Ternopil, Ukraine, 46009

Y. O. Rutetskyi

Post-graduate student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3227-3874>

Department of Computer Engineering

West Ukrainian National University, Lvivska St., 11, Ternopil, Ukraine, 46009

* corresponding author, e-mail: km.berezka@gmail.com

A Methodology for Ranking Urban Road Segments Based on Morning/Evening Peak Load and Average Speed

How to Cite:

Berezka, K. M., Shevchuk, O.S, Buriak, M. V, Rutetskyi, Y. O. (2026). A Methodology for Ranking Urban Road Segments Based on Morning/Evening Peak Load and Average Speed. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 401-415. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-30](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-30)

Abstract. The paper proposes a calculation-based methodology for spatiotemporal assessment of operating conditions of an urban road network at the road-segment level. The input data comprise geospatial indicators of traffic load and average speed during the morning (AM) and evening (PM) periods. To ensure comparability across segments, min-max normalization is applied and a composite Congestion Index (CI) is constructed, integrating load and speed into a single dimensionless scale and enabling segment ranking by the level of operational deficiency. The methodology includes: forming a unified analytical dataset for road segments; computing CI separately for AM and PM; determining the maximum value, CI^{max} , as an aggregated characteristic of peak-period criticality; and quantifying inter-period changes in operating conditions using $\Delta CI = CI_{pm} - CI_{am}$. Based on CI_{am} , CI_{pm} , and ΔCI , segments are ranked and priority sections are identified for first-order traffic management or infrastructure interventions (signal timing optimization, improvement of traffic schemes, and localized capacity enhancement measures). The methodology is validated using an urban network dataset (case study: Ternopil), which makes it possible to compile a list of segments with the highest congestion-index values in AM/PM and to identify sections exhibiting the greatest deterioration of traffic conditions in the evening period. The proposed approach is reproducible and can be implemented in GIS and/or spreadsheet environments for regular monitoring, comparison of alternative traffic organization schemes, and preparation of analytical inputs for engineering design decisions in urban construction. The results can serve as an engineering-analytical basis for prioritizing design solutions and planning measures aimed at improving the efficiency of urban road network operation.

Keywords: urban road network; road segments; congestion load; congestion index; spatiotemporal analysis

УДК 69.05:699.86

С. В. Пастухова*

старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0853-5611>

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Запорізький національний університет, проспект Соборний, 226, Запоріжжя, Україна 69000

*автор-кореспондент, e-mail: susannapastukhova@gmail.com

Багатокритеріальний синтез організаційно-технологічних рішень при зведенні енергозберігаючих цивільних будівель

Цитувати як:

Пастухова, С. В.. (2026). Багатокритеріальний синтез організаційно-технологічних рішень при зведенні енергозберігаючих цивільних будівель. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 416-428. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-31](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-31)

© 2026, Автор. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. Робота присвячена розв'язанню науково-прикладної проблеми нівелювання «енергетичного розриву» будівель шляхом удосконалення організаційно-технологічних рішень (ОТР) безпосередньо на етапі виконання будівельно-монтажних робіт. Актуальність дослідження обумовлена зростанням вимог до енергоефективності сучасних будівель та необхідністю забезпечення відповідності фактичних показників енергоспоживання проєктним значенням. Запропоновано нову математичну модель багатокритеріального синтезу, яка формалізує залежність між просторово-часовими параметрами будівельних потоків та втратами теплотехнічної однорідності огорожувальних конструкцій, враховуючи вплив технологічних перерв, погодних умов і людського фактора.

На відміну від традиційних підходів, що базуються переважно на календарному плануванні, у роботі застосовано метод оптимізації технологічних розривів між процесами влаштування теплоізоляції та її герметизації. Це дозволяє мінімізувати виникнення дефектів, пов'язаних із порушенням суцільності теплоізоляційного контуру, та зменшити тепловтрати ще на стадії зведення об'єкта. Розрахунковий експеримент, проведений із використанням імітаційного моделювання та варіативного аналізу, доводить, що перехід до індустріалізованого монтажу з високим ступенем просторового суміщення генерує суттєвий синергетичний ефект: енерговитрати технологічних процесів на стадії зведення скорочуються на 26,2%, а подальше експлуатаційне енергоспоживання – на 35,1%.

Встановлено, що попри локальне зростання початкової кошторисної вартості на 4%, інтегральний критерій технологічної ефективності зростає з 0,84 до 1,11, що свідчить про економічну доцільність впровадження запропонованих рішень у середньо- та довгостроковій перспективі. Додатково обґрунтовано, що оптимізація організаційно-технологічних параметрів позитивно

впливає на якість виконання робіт, знижує ризики виникнення прихованих дефектів і підвищує надійність експлуатаційних характеристик будівель.

Запропонована організаційно-технологічна модель дозволяє скоротити терміни зведення об'єкту на 21,4%, підвищити рівень керуваності будівельних процесів та виступає надійним інструментом гарантування досягнення проектних показників будівель з майже нульовим енергоспоживанням (nZEB), що відповідає сучасним європейським стандартам енергоефективності та сталого розвитку будівництва.

Ключові слова: багатокритеріальний синтез, індустріалізований монтаж, будівельний потік, технологічний розрив, енергетичний розрив

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Сучасний етап розвитку цивільного будівництва визначається масштабним переходом до зведення енергозберігаючих будівель, що закріплено на рівні європейських директив та національного законодавства України. [1; 2] Однак, критичною залишається проблема «енергетичного розриву» (energy performance gap), тобто суттєвої розбіжності між проектною енергоефективністю будівлі та її фактичним енергоспоживанням на стадії експлуатації. Практика свідчить, що до 70% факторів, які зумовлюють цей розрив, формуються не під час експлуатації, а безпосередньо в процесі зведення об'єкта через недосконалі організаційно-технологічні рішення (ОТР).

Традиційні підходи до організації будівельного виробництва розглядають зведення будівлі як набір дискретних операцій, що призводить до лінійної фрагментації технологічних потоків. З технологічної точки зору, це зумовлює виникнення неконтрольованих просторово-часових розривів між суміжними процесами (наприклад, між монтажем віконних блоків та влаштуванням захисного гідроізоляційного шару, між закріпленням теплоізоляційних плит). Такі організаційні паузи конвертуються у фізичні дефекти: атмосферне зволоження утеплювача, деструкцію стиків вітровими навантаженнями та утворення технологічних теплових містків [3; 4]. Для подолання цієї проблеми необхідний перехід від інструментів простого контролю термінів до багатокритеріального синтезу параметрів будівельних потоків. Виникає гостра потреба у математичному інструментарії, який дозволить проектувати технологію монтажу таким чином, щоб безперервність процесів гарантувала збереження проектного термічного опору оболонки будівлі.

Проблематика підвищення надійності монтажних процесів та мінімізації організаційних втрат (waste) глибоко досліджена в межах концепції ощадливого будівництва (Lean Construction) [5]. Фундаментальні засади картування потоку створення цінності, закладені у працях M. Rother

та J. Shook, доводять, що технологічні очікування та простоти є одними з найбільш деструктивних факторів виробництва [6]. Інтеграція цих принципів із методами системної динаміки (System Dynamics) успішно реалізована в дослідженнях S. Cano і V. Mota, які обґрунтували важливість забезпечення безперервності потоків на будівельному майданчику [7; 8].

Питання цифрової підтримки монтажних робіт розкриті у працях R. Sacks та X. Chen, які доводять ефективність інформаційного моделювання (4D/5D BIM) для превентивного виявлення просторових і часових колізій [9; 10]. Окремі аспекти удосконалення ОТР, з урахуванням енергетичних критеріїв, вивчалися вітчизняними науковцями, зокрема Козик В. В., Мандрика А. С. та Тугай О. А. [11; 12; 13].

Мета і завдання дослідження. Також, варто зазначити, що в чинній науковій літературі вплив технологічних колізій на енергетичний баланс будівлі розглядається переважно як другорядний або якісний фактор. На сучасному етапі відсутня спеціалізована математична модель, яка б переводила організаційні відхилення (наприклад, тривалість простою відкритого утеплювача) у конкретні фізичні показники втрати теплотехнічної однорідності конструкції. Формування такого математичного апарату із застосуванням методів багатокритеріального прийняття рішень (MCDM) є метою даного дослідження [14].

Матеріали та методи

Методикою досліджень передбачено комплексне поєднання теоретичних, аналітичних та імітаційних методів для формування організаційно-технологічних рішень при зведенні енергозберігаючих будівель. Теоретичною основою дослідження слугували положення нормативних документів у сфері енергоефективності будівель та теплотехнічного розрахунку огорожувальних конструкцій [1; 2; 3; 4]. Методологічний апарат дослідження базується на принципах ощадливого будівництва (Lean Construction) [5; 6; 7; 8], системної динаміки та багатокритеріального прийняття рішень (MCDM), що дозволяє врахувати взаємозв'язки між параметрами будівельних потоків, часовими розривами та енергетичними втратами [14].

У роботі використано такі методи дослідження: системний аналіз (для формалізації будівельного процесу як багатопараметричної системи з взаємопов'язаними організаційно-технологічними параметрами); методи математичного моделювання (для побудови функціональних залежностей між параметрами будівельних потоків (s_1 - s_4) та критеріями ефективності); багатокритеріальна оптимізація (MCDM) (для формування інтегрального критерію технологічної ефективності та вибору оптимального варіанту ОТР) [14]; імітаційне моделювання (для відтворення динаміки будівельних

процесів у часі та оцінки впливу технологічних розривів на результати зведення об'єкта); варіативний (сценарний) аналіз (для порівняння альтернативних стратегій організації будівництва).

Імітаційне моделювання будівельних потоків виконувалося із застосуванням програмного середовища FlexSim, що дозволило відтворювати складні дискретно-подієві процеси у будівництві [15], а для розрахунку конструктивних вузлів та оцінки впливу дефектів на теплотехнічні характеристики – програмний комплекс ЛІРА-САПР [16].

Отримані результати підлягали порівняльному аналізу з використанням інтегрального критерію ефективності, що дозволило обґрунтувати доцільність переходу до індустріалізованих технологій з мінімізацією технологічних розривів.

Результати та обговорення

1. Математичний апарат багатокритеріального синтезу ОТР

Для розв'язання задачі вибору оптимальної технології зведення розроблено математичну модель багатокритеріального синтезу.

Будівельний процес розглядається як багатопараметрична система, стан якої визначається вектором (1) організаційно-технологічних рішень S :

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}, \quad (1)$$

де s_1 – рівень індустріалізації (частка префабрикованих конструкцій підвищеної заводської готовності);

s_2 – коефіцієнт просторово-часового суміщення суміжних будівельних процесів на одній захватці;

s_3 – тривалість технологічного розриву (у годинах) між влаштуванням вразливих елементів (утеплювач) та їх герметизацією;

s_4 – рівень механізації монтажних робіт.

1.1. Формалізація технологічних втрат

Головною технологічною проблемою є втрата теплотехнічної однорідності [3; 4] конструкцій (ΔR) відносно нормативних вимог внаслідок організаційних пауз (s_3) та виконання процесів «мокрим» способом на майданчику замість індустріальної збірки (s_1). Функція втрати термічного опору формалізується як критерій якості $K_R(S)$ (2):

$$K_R(S) = \Delta R_{\text{втрата}} = \sum_{j=1}^m (\lambda_{\omega} \cdot s_{3,j} + \lambda_d \cdot (1 - s_1)) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де λ_{ω} – емпіричний коефіцієнт деградації теплоізоляції від атмосферного впливу за одиницю відкритого простору;

λ_d – технологічний коефіцієнт дефектності ручного неіндустріального монтажу.

1.2. Критерії технологічної тривалості та енергоємності

Також важливим критерієм є загальна тривалість зведення об'єкта $K_T(S)$, яка залежить від ступеня паралельності робіт (s_2) та рівня механізації (s_4) згідно з нормативами організації виробництва (3) [13]:

$$K_T(S) = T_{\text{буд}} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{P_i \cdot s_4} \cdot (1 - s_2) \rightarrow \min, \quad (3)$$

де V_i – обсяги робіт;

P_i – нормативна продуктивність.

Третім критерієм є енергоємність самих будівельних процесів $K_E(S)$, що враховує роботу машин, механізмів та витрати на тимчасове опалення для підтримки технологічних температур (4):

$$K_E(S) = E_{\text{буд}} = E_{\text{мех}}(s_4) + E_{\text{тех}} + E_{\text{тимч}}(s_3) \rightarrow \min, \quad (4)$$

Скорочення технологічних розривів ($s_3 \rightarrow 0$) прискорює закриття теплового контуру та радикально знижує параметр $E_{\text{тимч}}$.

1.3. Цільова функція багатокритеріального синтезу

Оскільки технологічні критерії мають різну розмірність і часто конфліктують (наприклад, підвищення префабрикації збільшує вартість, але скорочує час і втрати), для пошуку оптимуму застосовано метод адитивної згортки. Інтегральний критерій технологічної ефективності набуває вигляду (5):

$$K_{\text{отр}} = \alpha \frac{R_{\text{проект}}}{R_{\text{проект}} - K_R(S)} + \beta \frac{T_{\text{баз}}}{K_T(S)} + \gamma \frac{E_{\text{баз}}}{K_E(S)} \rightarrow \max, \quad (5)$$

де α, β, γ – вагові коефіцієнти значущості ($\alpha + \beta + \gamma = 1$). Для забезпечення характеристик nZEB пріоритет віддається збереженню теплотехнічних властивостей ($\alpha \geq 0,5$).

Практична логіка реалізації запропонованого математичного апарату відображена на структурно-логічних схемах (рис. 1).

Ця схема у вигляді діаграми Ганта ідеально ілюструє, як традиційний метод створює втрати часу (розриви s_3), а індустріалізований метод стискає процеси в один нерозривний блок.

На Рисунок 2 представлена блок-схема, яка розкриває ітераційний інженерний алгоритм: від введення обсягів робіт та формування варіантів потоків до розрахунку деградації термічного опору $K_R(S)$, перевірки нормативних обмежень та остаточного вибору оптимального ОТР.

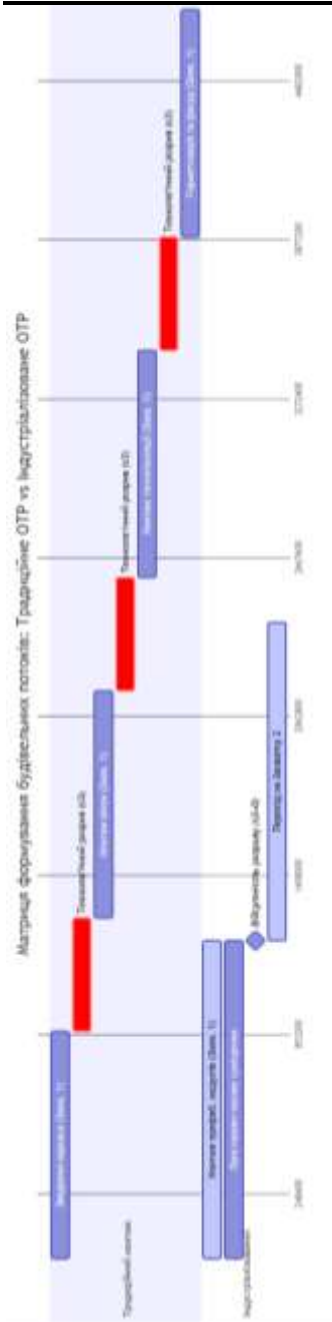


Рис. 1. Структурно-параметрична матриця формування будівельних потоків:
уєунення технологічного розриву (s_3) за рахунок просторово-часового
суміщення (s_4) та інплустріалізації (s_1)

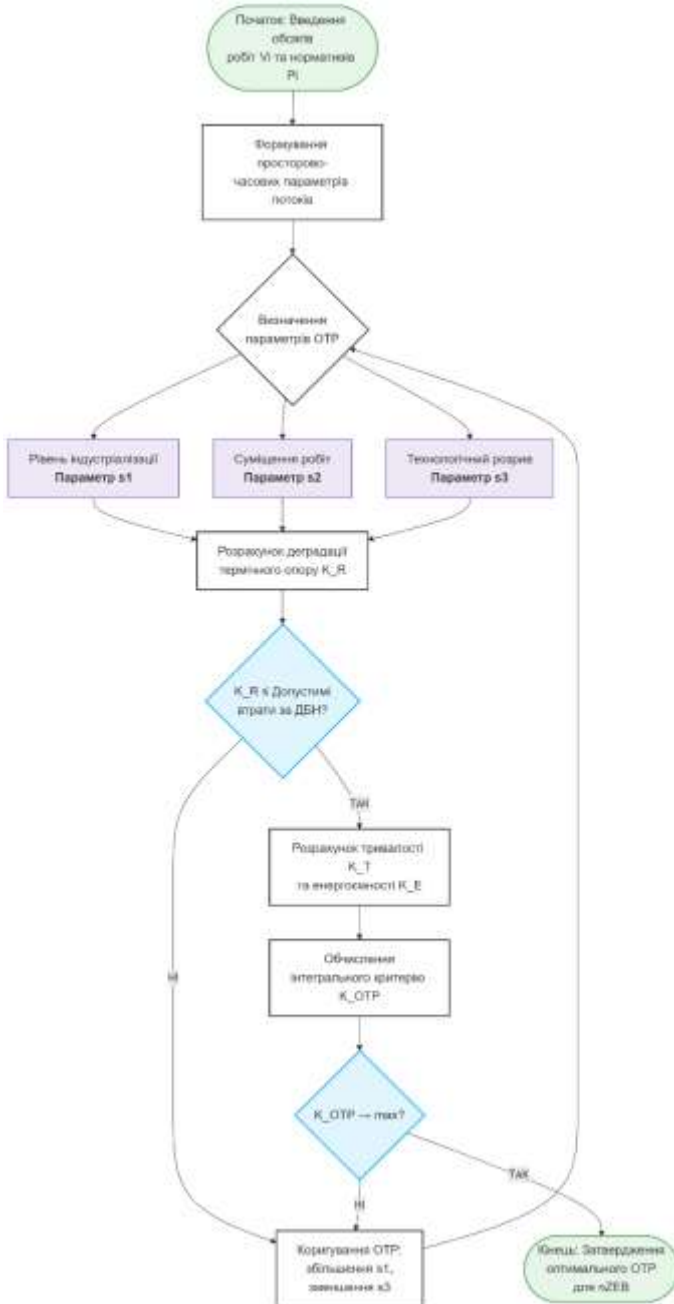


Рис. 2. Алгоритм багатокритеріального синтезу організаційно-технологічних рішень при зведенні енергозберігаючих будівель

2. Верифікація моделі та аналіз результатів

Для підтвердження ефективності розробленого апарату проведено імітаційне моделювання монтажних процесів для базового 5-поверхового цивільного об'єкта (площею 6000 м²), граничні параметри якого було деталізовано для забезпечення репрезентативності розрахункового експерименту та можливості подальшого масштабування результатів: розташування об'єкта в I температурній зоні України (що зумовлює підвищені нормативні вимоги до термічного опору огорожувальних конструкцій), застосування конструктивної системи у вигляді монолітного залізобетонного каркаса. Обчислення проводилися із застосуванням середовища FlexSim для симуляції потоків та вітчизняного програмного комплексу ЛІРА-САПР для розрахунку конструктивних вузлів та оцінки впливу дефектів на теплотехнічні характеристики. Порівнювалися дві технологічні стратегії (таблиця 1):

1) сценарій А (традиційний). Послідовне виконання робіт (вікна, утеплення, фасад) з низьким ступенем префабрикації ($s_1 = 0,1$). Середній технологічний розрив s_3 становить 72 години;

2) сценарій В (оптимізований). Індустріалізований монтаж з використанням стінових модулів високої заводської готовності ($s_1 = 0,85$). Високий рівень просторово-часового суміщення ($s_2 \rightarrow \max$), розрив s_3 мінімізовано до 4 годин.

Таблиця 1. Результати моделювання ефективності організаційно-технологічних стратегій

Показник ефективності	Сценарій А (традиційний)	Сценарій В (індустріалізований)	Відхилення (Δ), [%]
Енерговитрати будівництва ($E_{\text{буд}}$), [МВт*год]	420	310	-26,2
Прогнозні експлуатаційні енерговитрати ($E_{\text{експ}}$), [МВт*год/рік]	185	120	-35,1
Тривалість зведення ($T_{\text{буд}}$), [міс.]	14	11	-21,4
Кошторисна вартість зведення (С), [млн грн]	98	102	+4,08

Аналіз даних (таблиця 1) підтверджує, що синтез ОТР за Сценарієм В знижує енергоємність будівельних процесів на 26,2% завдяки ліквідації

простоїв та скороченню часу на тимчасове опалення відкритих контурів. Найсуттєвішим досягненням є зменшення експлуатаційного енергоспоживання на 35,1%. Математично доведено, що скорочення технологічного розриву (s_3) запобігає втраті термічного опору, зберігаючи теплотехнічну однорідність оболонки на рівні 98,5% від проектної.

Попри локальне зростання початкових інвестицій на 4,08% (через вищу вартість префабрикованих модулів), загальна ефективність є беззаперечною. Розрахунок інтегрального критерію ($\alpha = 0,6$) показав зростання K_{OTP} з 0,84 (для сценарію А) до 1,11 (для сценарію В). Скорочення термінів будівництва на 21,4% (з 14 до 11 місяців) нівелює початкове здорожчання робіт за рахунок зменшення накладних витрат.

Висновки

На основі проведеного дослідження доведено, що фундаментальним деструктивним фактором, який формує «енергетичний розрив» під час зведення цивільних будівель, є не стільки якість застосованих матеріалів, скільки просторово-часова десинхронізація будівельних процесів. Традиційні методи організації робіт генерують значні технологічні розриви між етапами влаштування теплоізоляції та її фінішною герметизацією, через що вплив зовнішніх факторів призводить до втрати проектної теплотехнічної однорідності огорожувальних конструкцій [3].

Для розв'язання цієї проблеми було розроблено нову математичну модель багатокритеріального синтезу організаційно-технологічних рішень, яка переносить фокус оптимізації з глобальних макропоказників проекту на мікропараметри монтажних потоків. Введена цільова функція мінімізації втрат теплотехнічної однорідності дозволила алгоритмічно обґрунтувати технологічну необхідність переходу до префабрикації індустріальних елементів, а також максимального просторово-часового суміщення робіт безпосередньо на будівельному майданчику.

Проведений розрахунковий експеримент повністю підтвердив ефективність запропонованого математичного апарату. Імплементация індустріалізованого монтажу дозволила ефективно усунути організаційні розриви, що забезпечило скорочення загальних термінів зведення об'єкта на 21,4% та суттєво зменшити експлуатаційні енерговитрати на 35,1%. Незважаючи на локальне зростання початкових капіталовкладень на 4% через вартість заводських модулів, підсумковий розрахунок інтегрального критерію технологічної ефективності засвідчив його зростання з 0,84 до 1,11. Це беззаперечно доводить, що запропоновані організаційно-технологічні рішення є дієвими та економічно виправданим механізмом гарантування показників будівель з майже нульовим енергоспоживанням (nZEB) на всьому їхньому життєвому циклі.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що у нього немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Автор заявляє, що дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Автор заявляє, що усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи він не використовував технології штучного інтелекту.

References

1. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel, Zakon Ukrainy № 2118-VIII (2025) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
2. Dyrektyva Yevropeiskoho Parlamentu i Rady 2010/31/Yes vid 19 travnia 2010 roku pro enerhetychni kharakterystyky budivel (nova redaktsiia), Dyrektyva Yevropeiskoho Soizu № 2010/31/Yes (2018). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text
3. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel: DBN V.2.6-31:2021. (2022). Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy. 23 s.
4. Enerhoefektyvnist budivel. Enerhopotreby dlia opalennia ta okholodzhennia, vnutrishni temperatury i navantazhennia za yavnoiu ta prykhvanoiu teplotoiu. Chastyna 1. Metodyky rozrakhunku (EN ISO 52016-1:2017, IDT; ISO 52016-1:2017, IDT): DSTU EN ISO 52016-1:2022. (2023). Vyd. ofits. Kyiv : DP «UkrNDNTs». 27 s.
5. Pastukhova, S., Arutiunian, I., & Azhazha, M. (2025b). Improvement of organizational and technological solutions considering energy efficiency principles and sustainable development in civil construction. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 2(55), 189-198. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(2\).189-198](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(2).189-198)
6. Rother, M., Shook, J. (2003). Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda. Brookline : Lean Enterprise Institute. 102 p.
7. Cano, S., & Rubiano, O. (2020). Dynamics Model of the Flow Management of Construction Projects: Study of Case. *Y 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. International Group for Lean Construction. <https://doi.org/10.24928/2020/0110>
8. Mota, B. P., Viana, D. et Isatto, E. L. (2010). Simulating the Last Planner With Systems Dynamic. *Y 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1345.2327>
9. Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A., & Owen, R. (2010b). Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction*

10. Chen, X., Zhu, Y., Chen, H., Ouyang, Y., Luo, X., & Wu, X. (2021). BIM-based optimization of camera placement for indoor construction monitoring considering the construction schedule. *Automation in Construction*, 130, 103825. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103825>

11. Kozyk, V. V., Marushchak, U. D., & Marko, O. Y. (2024b). Assessment of Energy Efficiency in the Life Cycle of Residential Building Objects. *Business Inform*, 5(556), 201-207. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-5-201-207>

12. Mandryka, A. S. ta in. (2021). *Enerhoefektyvni tekhnolohii : navchalnyi posibnyk* (za zah. red. A. S. Mandryky). Sumy : Sumskiy derzhavnyi universytet. 330 s. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/997e7d13-39b2-46ef-9b8d-b9bdcc6233b0/content>

13. Tuhai, O. A. ta in. (2018). *Orhanizatsiia budivelnoi diialnosti : pidruchnyk*. Kyiv : «MP Lesia». 247 s.

14. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014b). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 165-179. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>

15. *AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions*. (б. д.). AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions. <https://www.anylogic.com/> (date of access: 11.05.2026)

16. *Structural Analysis Software*. (б. д.). Structural engineering software | Liraland Group. <https://www.liraland.com/lira/> (date of access: 11.05.2026)

Література

1. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII : станом на 3 серп. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>

2. Директива Європейського Парламенту і Ради 2010/31/ЄС від 19 травня 2010 року про енергетичні характеристики будівель (нова редакція) : Директива Європ. Союзу від 19.05.2010 № 2010/31/ЄС : станом на 24 груд. 2018 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text

3. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [На заміну ДБН В.2.6-31:2016; чинний від 2022-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2022. 23 с.

4. ДСТУ EN ISO 52016-1:2022. Енергоефективність будівель. Енергопотребы для опалення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплотою. Частина 1. Методики розрахунку (EN ISO 52016-1:2017, IDT; ISO 52016-1:2017, IDT). [На заміну ДСТУ Б EN ISO 13790:2011; чинний від 2024-06-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 27 с.

5. Pastukhova S., Arutiunian I., Azhazha M. Improvement of organizational and technological solutions considering energy efficiency principles and sustainable development in civil construction. *Ways to Improve Construction Efficiency*. 2025. Vol. 2, № 55. P. 189-198. URL: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(2\).189-198](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(2).189-198)

6. Rother M., Shook J. Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda. Brookline : Lean Enterprise Institute, 2003. 102 p.

7. Cano S., Rubiano O. Dynamics Model of the Flow Management of Construction Projects: Study of Case. *28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, Berkeley, California, USA, 6-10 July 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.24928/2020/0110>

8. Mota B. P., Viana D. et Isatto E. L. Simulating the Last Planner With Systems Dynamic. *18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Haifa, Israel. 2010. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1345.2327>

9. Sacks R. et al. Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2010. Vol. 136, № 9. P. 968-980. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000203](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000203)

10. Chen X. et al. BIM-based optimization of camera placement for indoor construction monitoring considering the construction schedule. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 130. P. 103825. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103825>

11. Kozyk V. V., Marushchak U. D., Marko O. Y. Assessment of Energy Efficiency in the Life Cycle of Residential Building Objects. *Business Inform*. 2024. Vol. 5, № 556. P. 201-207. URL: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-5-201-207>

12. Мандрика А. С. та ін. Енергоефективні технології : навчальний посібник ; за заг. ред. А. С. Мандрики. Суми : Сумський державний університет, 2021. 330 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/997e7d13-39b2-46ef-9b8d-b9bdbc6233b0/content>

13. Тугай О. А. та ін. Організація будівельної діяльності : підручник. Київ : «МП Леся», 2018. 247 с.

14. Zavadskas E. K., Turskis Z., Kildienė S. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*. 2014. Vol. 20, № 1. P. 165-179. URL: <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>

15. AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions. *AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions* : website. URL: <https://www.anylogic.com/> (дата звернення: 11.05.2026)

16. Structural Analysis Software. *Structural engineering software | Liraland Group* : website. URL: <https://www.liraland.com/lira/> (дата звернення: 11.05.2026)

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.05.2026	Received 12.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 24.05.2026	Received in revised form 24.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

S. V. Pastukhova*

Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0853-5611>

Department of Industrial and Civil Engineering

Zaporizhzhia National University, Sobornyi Avenue, 226, Zaporizhzhia, Ukraine 69000

*corresponding author, e-mail: susannapastukhova@gmail.com

Multi-criteria synthesis of organizational and technological solutions in the construction of energy-saving civil buildings

How to Cite:

Pastukhova, S. V. (2026). Multi-criteria synthesis of organizational and technological solutions in the construction of energy-saving civil buildings. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 416-428. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-31](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-31)

Abstract. The work is devoted to solving the scientific and applied problem of leveling the «energy gap» of buildings by improving organizational and technological solutions (OTR) directly at the stage of construction and installation works. The relevance of the study is due to the increase in requirements for energy efficiency of modern buildings and the need to ensure that actual energy consumption indicators correspond to design values. A new mathematical model of multi-criteria synthesis is proposed, which formalizes the dependence between the spatial-temporal parameters of construction flows and losses of thermal uniformity of enclosing structures, taking into account the influence of technological breaks, weather conditions and the human factor. Unlike traditional approaches, which are based mainly on calendar planning, the work uses a method of optimizing technological gaps between the processes of installing thermal insulation and its sealing. This allows to minimize the occurrence of defects associated with a violation of the continuity of the thermal insulation contour and reduce heat loss even at the stage of construction of the object. A computational experiment conducted using simulation modeling and variant analysis proves that the transition to industrialized assembly with a high degree of spatial combination generates a significant synergistic effect: the energy consumption of technological processes at the construction stage is reduced by 26,2%, and the subsequent operational energy consumption is reduced by 35,1%.

It was established that despite the local increase in the initial estimated cost by 4%, the integral criterion of technological efficiency increases from 0,84 to 1,11, which indicates the economic feasibility of implementing the proposed solutions in the medium and long term. Additionally, it is substantiated that the optimization of organizational and technological parameters has a positive effect on the quality of work, reduces the risks of hidden defects and increases the reliability of the operational characteristics of buildings.

The proposed organizational and technological model allows you to reduce the construction time of the facility by 21,4%, increase the level of controllability of construction processes and serves as a reliable tool for guaranteeing the achievement of design indicators of buildings with almost zero energy consumption (nZEB), which meets modern European standards of energy efficiency and sustainable development of construction.

Keywords: multi-criteria synthesis, industrialized assembly, construction flow, technological gap, energy gap

УДК 621.311

О. А. Пахолук*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0650-6446>

Кафедра будівництва та інфраструктурної інженерії

І.О. Бандура

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2166-4909>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В. С. Довбенко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9575-2931>

Центр енергоефективності НУВГП

Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, Рівне, Україна, 33000

* автор-кореспондент, e-mail: orest.pakholiuk@gmail.com

Енергомоніторинг у громадських будівлях

Цитувати як:

Пахолук, О.А., Бандура І.О., Довбенко В.С. (2026). Енергомоніторинг у громадських будівлях. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 429-443. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-32](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-32)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розглянуто енергомоніторинг у громадських будівлях як інструмент системного управління споживанням енергоресурсів, експлуатаційною ефективністю та обґрунтуванням енергоефективних заходів. Показано, що енергоменеджмент та енергомоніторинг формують організаційну, аналітичну й нормативну основу для переходу від епізодичного контролю до постійного управління енергією. Проаналізовано законодавчі передумови впровадження систем енергетичного менеджменту в Україні, їх значення для органів місцевого самоврядування, бюджетних установ і технічної модернізації об'єктів. Виділено шість типових схем енергомоніторингу: базову ручну або напівавтоматизовану, схему з розподільним об'ємом, автоматизовану схему, схему мікрокліматичного моніторингу, схему аналітики та управлінського реагування, а також модель, інтегровану в логіку ISO 50001 і циклу PDCA. Для кожної схеми окреслено сферу застосування, склад даних, можливості виявлення відхилень, управлінську цінність та обмеження. Обґрунтовано, що ефективність енергомоніторингу визначається не стільки рівнем автоматизації, скільки наявністю повного циклу «дані – аналіз – рішення – дія – перевірка результату – коригування». Показано, що навіть за обмеженого фінансування можливе поетапне впровадження системи моніторингу від простого збору показників до розширеної цифрової платформи. Зроблено висновок, що системний енергомоніторинг дозволяє виявляти неефективне споживання, оцінювати ефект від заходів, пріоритезувати інвестиції, підвищувати комфорт користувачів і

формуванню доказової бази для управлінських рішень. Особливу увагу слід приділяти підготовці персоналу. Окремо підкреслено, що для великих, енергоємних і технічно складних об'єктів доцільним є перехід до розподільного та автоматизованого обліку, тоді як для закладів з обмеженими ресурсами стартовою може бути спрощена модель із регулярним зняттям показників та подальшим аналізом. Доведено, що ключовою умовою результативності є наявність підготовленого персоналу та управлінського реагування на виявлені відхилення для бюджетних установ.

Ключові слова: енергомоніторинг; енергоменеджмент; громадські будівлі; автоматизований облік; ISO 50001.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

Енергоменеджмент та енергомоніторинг є необхідними елементами сучасного управління будівлями, підприємствами, установами та територіальними громадами, оскільки дозволяють перейти від простого споживання енергії до системного управління нею. Енергія в цьому випадку розглядається не лише як комунальна витрата, а як керований ресурс, який безпосередньо впливає на бюджет, комфорт користувачів, технічний стан будівель, надійність експлуатації, екологічний вплив та інвестиційну привабливість об'єкта.

Необхідність енергоменеджменту закріплена законодавчо. Закон України «Про енергетичну ефективність» визначає енергоефективність як кількісне співвідношення між отриманою корисною роботою, послугами, товарами або енергією та витраченою енергією на вході. Цей же закон визначає енергоефективні заходи як технічні, організаційні, економічні або інформаційні дії, результат яких можна виміряти або розрахувати. Отже, будь-яке рішення у сфері енергоефективності має бути вимірюваним із своїм показником результативності [1].

Закон визначає систему енергетичного менеджменту як систему управління, що встановлює енергетичну політику, цілі, завдання, плани дій і процеси для їх досягнення. Вона має включати відповідальних осіб, регулярний збір даних, аналіз споживання, планування заходів, контроль виконання, оцінку економії та коригування дій. Також передбачено, що органи державної влади та підпорядковані їм установи запроваджують і забезпечують функціонування систем енергетичного менеджменту, а органи місцевого самоврядування впроваджують такі системи із врахуванням відповідної постанови [1].

Для органів місцевого самоврядування наявність рішення про запровадження системи енергетичного менеджменту є обов'язковою умовою отримання державної підтримки на впровадження енергоефективних заходів. Тобто це інституційна передумова для участі у

програмах модернізації, залучення фінансування та обґрунтування інвестицій. Без системи управління енергією складно довести базове споживання, обґрунтувати очікувану економію, підтвердити результат і коректно використовувати зекономлені кошти [1].

Якщо енергоменеджмент відповідає на питання «хто, що і навіщо робить», то енергомоніторинг відповідає на питання «що реально відбувається». Він передбачає регулярний збір і аналіз даних про споживання електроенергії, теплової енергії, газу, води, а також пов'язаних факторів: температури зовнішнього повітря, графіку роботи будівлі, кількості користувачів, режимів вентиляції, стану обладнання, аварійних ситуацій, сезонних відхилень. Власне моніторинг дозволяє побачити, чи споживання відповідає режиму експлуатації, чи є нічні втрати, чи працює опалення у вихідні, чи не зростає базове навантаження без зрозумілої причини. Законодавство також вводить поняття інтелектуальних систем обліку та інтелектуальних лічильників, які забезпечують вимірювання, обмін даними, моніторинг і контроль [1].

Практична необхідність енергомоніторингу полягає в тому, що без даних неможливо управляти споживанням. Разовий енергоаудит може визначити потенціал економії та перелік заходів, але він не забезпечує постійного контролю після впровадження рішень. Будівля - це жива система: змінюються користувачі, режими роботи, обладнання, погодні умови, налаштування автоматики, якість обслуговування. Тому навіть якісно виконана термомодернізація, модернізація ІПП або заміна освітлення можуть не дати стабільного результату без подальшого управління. У практичному посібнику з енергоменеджменту у будівлях зазначено, що енергоменеджмент дозволяє контролювати споживання енергії та виявляти її нераціональне використання, а застосування лише технічних рішень не може гарантувати стабільну економію [2].

Енергоменеджмент є першим обов'язковим кроком для розумного управління енергоспоживанням, який має допомогти органам влади, громадам і підприємствам зупинити марні втрати енергії та коштів.

Для бюджетних установ це має особливе значення. Кошти, які витрачаються на надлишкове споживання енергії, фактично вилучаються з інших потреб: ремонту приміщень, оновлення обладнання, благоустрою, соціальних послуг, оплати праці, розвитку громади. У публікації Держенергоефективності наведено приклад Луцька: у місті ще у 2011 році було прийнято концепцію впровадження системи енергоменеджменту, енергомоніторинг здійснювався майже у всіх бюджетних установах, а загальна економія бюджетних коштів з початку реалізації енергомоніторингу склала понад 10 млн грн, що становило в середньому 15% економії витрат на теплоносії. Це показує, що енергомоніторинг - не

«теорія з презентації», а практичний інструмент, який уже давав вимірюваний ефект на рівні міської інфраструктури [3].

Енергоменеджмент також потрібен для правильного вибору інвестиційних заходів. Без моніторингу неможливо визначити, що саме є пріоритетом: утеплення огорожувальних конструкцій, модернізація системи опалення, балансування, заміна освітлення, встановлення автоматики, ремонт вентиляції чи зміна режимів експлуатації. У будівлях часто є спокуса почати з видимих рішень - фасад, вікна, LED-світильники, сонячні панелі. Але енергетична логіка вимагає спочатку зрозуміти профіль споживання, базове навантаження, сезонні піки, неефективні зони, вплив користувачів та технічний стан систем [7-12].

Міжнародна практика також підтверджує необхідність системного підходу. Стандарт ISO 50001 розроблений як практичний інструмент для покращення використання енергії через створення системи енергетичного менеджменту. Він застосовується для організацій різних секторів і масштабу і орієнтований на постійне поліпшення енергетичних показників. Його логіка базується на циклічному процесі: планування, впровадження, перевірка результатів, коригування та повторне вдосконалення [4].

Енергомоніторинг створює базу для прозорості та відповідальності. Коли дані збираються регулярно, можна порівнювати будівлі між собою, виявляти аномалії, формувати рейтинги, визначати найпроблемніші об'єкти, перевіряти ефект від заходів, планувати бюджети на наступні періоди.

Законодавство України визначає економію енергії як обсяг скорочення споживання, що встановлюється шляхом зіставлення обсягів до і після впровадження заходів із нормалізацією зовнішніх і внутрішніх умов, які впливають на енергоспоживання. Саме тому якісний моніторинг потрібен ще до модернізації, а не лише після неї [1].

Об'єкт, на якому відомі навантаження, піки, критичні споживачі та можливості скорочення попиту, легше адаптується до обмежень, аварійних режимів, резервного живлення або переходу на альтернативні джерела.

Будівлі залишаються одним із ключових секторів енергоспоживання: за даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2024 році будівлі становили близько 30% світового попиту на енергію. Тому управління енергією в будівлях є одним із центральних напрямів енергоефективної політики [5].

Таким чином, енергоменеджмент і енергомоніторинг слід впроваджувати не як разовий проєкт, а як базову управлінську функцію. Вони створюють основу для енергоаудиту, термомодернізації, залучення фінансування, контролю результатів, підвищення комфорту та

відповідального використання ресурсів. Якщо коротко: енергоаудит показує, де потенціал; енергомоніторинг показує, що реально відбувається; енергоменеджмент забезпечує, щоб після всіх гарних звітів хтось справді закрив вікно, налаштував автоматику і т.д.

Мета статті – проаналізувати типові схеми енергомоніторингу в громадських будівлях та показати на прикладі варіант виконання в умовах певної обмеженості в коштах.

Матеріали та методи

У роботі використовуються матеріали проєктної документації. Також використано матеріали нормативних документів і законодавства України.

Результати та обговорення

Енергомоніторинг у громадських будівлях - це не лише регулярне зняття показників лічильників, а організований процес збору, накопичення, обробки, аналізу та відображення даних про споживання енергії, енергоносіїв і комунальних послуг. Постанова Кабінету Міністрів України №1460 визначає енергомоніторинг як процес збирання даних з вузлів комерційного, розподільного, технологічного обліку та інших засобів вимірювальної техніки з метою аналізу ефективності споживання і виробництва енергії та комунальних послуг [6]. Можемо виділити 6 основних схем.

1. Базова ручна або напівавтоматизована схема

Це найпростіша схема, з якої зазвичай починають школи, дитячі садки, амбулаторії, адміністративні будівлі, будинки культури та інші бюджетні об'єкти без складної автоматики. Джерелами даних у такій схемі є вузли комерційного обліку, рахунки постачальників, акти споживання, ручні записи відповідальної особи, а також дані про режим роботи будівлі, температуру зовнішнього повітря та кількість користувачів.

Зазвичай процес виглядає таким чином: відповідальна особа у будівлі у визначений час знімає показники лічильників теплової енергії, електроенергії, газу, холодної та гарячої води; вносить їх в електронну форму або таблицю (деколи журнал); енергоменеджер перевіряє коректність даних, порівнює їх з попередніми періодами та виявляє відхилення. За відсутності автоматизованого енергомоніторингу мінімальна періодичність збору даних за постановою №1460 становить двічі на тиждень: щопонеділка станом на 10:00 та щоп'ятниці станом на 16:00. Також допускається щоденний моніторинг із зняттям показників в один і той самий час доби [6].

Перевагою цієї схеми є низький поріг входу. Для старту не потрібні складні датчики, диспетчеризація чи BMS. Достатньо призначити відповідальних осіб, уніфікувати форму збору даних, визначити періодичність та налагодити регулярний аналіз. Недоліком є людський фактор: пропуски, помилки введення, несвоєчасне зняття показників, складність оперативного реагування. Така система добре бачить проблему яка вже сталася, але гірше ловить її в момент виникнення. Якщо в будівлі вночі працює вентиляція або є витік води, ручний моніторинг помітить це лише після наступного зняття показників.

Типовий склад даних для базової схеми: адреса та функція будівлі, площа, опалюваний об'єм, графік роботи, кількість користувачів, показники лічильників, рахунки, тарифи, фактичні витрати у натуральних і грошових показниках, температура зовнішнього повітря, інформація про аварії, ремонти, канікули, зміну режимів роботи. Базовими показниками аналізу є питоме споживання на одиницю площі, об'єму чи користувача.

2. Схема з розподільним обліком

Наступною є схема, у якій будівля має не тільки загальний комерційний вузол обліку, а й додаткові точки розподільного або технологічного обліку. Вона є доцільною для великих шкіл, лікарень, спортивних комплексів, адміністративних центрів, ЦНАПів, закладів з орендарями або будівель зі змішаними функціями.

У такій схемі загальний лічильник показує споживання всієї будівлі, а додаткові лічильники деталізують його за корпусами, поверхами, функціональними зонами, орендарями, харчоблоком, спортивною залом, серверною, насосною, вентиляційною камерою, зовнішнім освітленням або іншим енергоємним обладнанням. Постанова №1460 передбачає збір даних не тільки з комерційного, а й з розподільного та технологічного обліку, якщо такі вузли є [6]. Ця схема особливо важлива там, де різні частини будівлі мають різний графік роботи.

Типовими рішеннями є окремі електролічильники на групи споживачів, теплолічильники або витратоміри на гілках системи опалення; лічильники води для харчоблоку, санвузлів, технічних зон; контроль роботи насосів, вентиляційних установ, бойлерів, зовнішнього освітлення.

3. Автоматизована схема енергомоніторингу

Автоматизована схема передбачає дистанційне зчитування даних з лічильників і датчиків, передачу інформації через контролери або шлюзи, збереження на сервері чи у хмарній системі, побудову дашбордів, формування попереджень і звітів.

Для автоматизованого енергомоніторингу мінімальна періодичність збору даних становить один раз на 10 хвилин. Це принципово змінює якість управління. Вона може показати проблему майже в режимі

реального часу: нічне навантаження, несанкціоноване ввімкнення обладнання, аварійний витік, перетоп, зупинку насоса, перевищення температури, аномальне споживання електроенергії у вихідні [6].

Типова архітектура автоматизованої системи включає: лічильники з імпульсним або цифровим виходом, датчики температури, вологості, CO₂, освітленості, контролери, шлюзи передачі даних, сервер або хмарну платформу, програмне забезпечення для аналізу, кабінет енергоменеджера, систему сповіщень і звітності. Для зв'язку можуть застосовуватись дротові або бездротові протоколи, залежно від об'єкта: Ethernet, GSM/LTE, LoRaWAN, M-Bus, Modbus, BACnet або інтеграція з BMS/SCADA. Автоматизація не скасовує потребу в енергоменеджері. Навпаки, вона зменшує ручну рутину і підсилює аналітичну функцію.

4. Схема мікрокліматичного моніторингу

Окремо варто виділяти моніторинг не лише енергії, а й умов у приміщеннях. Для громадських будівель це критично, тому що економія не повинна досягатися шляхом погіршення температури, вентиляції або освітленості. Передбачено збір інформації про умови мікроклімату в будівлях, а також використання даталогерів температури, вологості, CO₂, люксметра, анеометра, пірометра і, рекомендовано, тепловізора як спеціалізованого обладнання для енергоменеджменту [6].

Ця схема особливо важлива для шкіл, дитсадків, лікарень, ЦНАПів та інших будівель з постійним перебуванням людей.

Типовими параметрами є температура повітря, відносна вологість, CO₂, освітленість, температура поверхонь, швидкість повітря, графік роботи вентиляції, фактична присутність людей. У звітах ці дані варто показувати поряд із енергоспоживанням: тоді видно, чи економія досягнута без погіршення умов перебування.

5. Схема аналітики та управлінського реагування

Дані енергомоніторингу мають сенс лише тоді, коли за ними йде управлінська дія. Передбачено щомісячний порівняльний аналіз споживання з попередніми періодами, встановлення причинно-наслідкових зв'язків відхилень, підготовку звіту для керівника, а також визначення потенціалу економії у розрізі кожної будівлі [6].

Типова схема реагування виглядає таким чином. Система або відповідальна особа фіксує відхилення; енергоменеджер перевіряє його причину; технічна служба або адміністрація будівлі отримує завдання; після виконання дії показники перевіряються повторно; результат потрапляє у місячний або річний звіт. Якщо відхилення повторюється, воно стає не разовою помилкою, а підставою для технічного заходу: балансування системи опалення, налаштування ІТП, ремонт арматури,

утеплення ділянки, заміна обладнання, зміна графіку роботи або включення об'єкта до інвестиційного плану.

Основними аналітичними показниками є абсолютне і питоме споживання енергії, споживання на користувача, витрати у гривнях, базове навантаження, нічне споживання, пікові навантаження, сезонні відхилення, погодна нормалізація, ефект від заходів, фактична економія, термін окупності. Саме ці показники дозволяють перейти від інтуїтивного управління до доказового.

6. Схема енергомоніторингу як частина ISO 50001 / PDCA

Міжнародна логіка енергоменеджменту базується на циклі Демінга-Шухарта: планування, виконання, перевірка, коригування. ISO 50001 визначає систему енергоменеджменту як практичний спосіб покращення використання енергії через політику, цілі, дані, вимірювання результатів, аналіз ефективності та постійне вдосконалення [4].

Тобто у громадській будівлі спочатку визначають базовий рівень споживання, цілі та показники; потім впроваджують заходи і збирають дані; далі перевіряють, чи досягнуто економії; після цього коригують режими, плани і технічні рішення. Визначено чотири етапи щорічного циклу: планування - виконання - перевірка - коригування. У цьому сенсі енергомоніторинг є не фінальним продуктом, а інструментом прийняття рішень [6].

Вартість подібних систем є достатньо високою, тому ще одним викликом буде пошук фінансування. Тому активна участь у грантових програмах дозволить впровадити систему енергоменеджменту швидше і у більшому обсязі.

У 2026 році ГО «Школа енергоефективності» приступила до впровадження проекту «Економія енергії та моніторинг енергоспоживання в будівлях закладів вищої освіти», який реалізується в межах програми IKT Small Grants, що фінансується Федеральним міністерством економіки та захисту клімату Німеччини в рамках Міжнародної кліматичної ініціативи (IKI).

Метою проекту є визначення поточного рівня впровадження систем енергоменеджменту в ЗВО та запропонувати концепції їх подальшого розвитку. Це кропітка системна робота, партнерство та конкретні інструменти для підвищення енергоефективності будівель університетів.

У процесі реалізації буде впроваджено систему автоматизованого енергомоніторингу з виведенням поточної інформації на інформаційні екрани в ЕнІнХабах Києва, Луцька, Миколаєва, Сум та Чернівців. Будуть оновлені політики і посадові інструкції ЗВО, розроблено навчальну програму та проведено тренінг для викладачів ЗВО.

На даному етапі проведено розробку проектної документації і система знаходиться у процесі монтажу.

Система енергомоніторингу буде складатися з:

- центральної диспетчерської на якій розміщується програмне забезпечення «верхнього рівня»;
- пунктів збору та передачі інформації на об'єктах;
- вузлів обліку енергетичних ресурсів, що мають інтерфейсний вихід для передачі даних та давачів температур.

Блок збору та передачі даних системи із заданою періодичністю опитуватиме вузли обліку та давачі температур з подальшим записом їх показань у локальну базу даних. Через мережу Інтернет дані передаватимуться на центральний сервер.



Рис. 1. Загальна структура системи енергомоніторингу

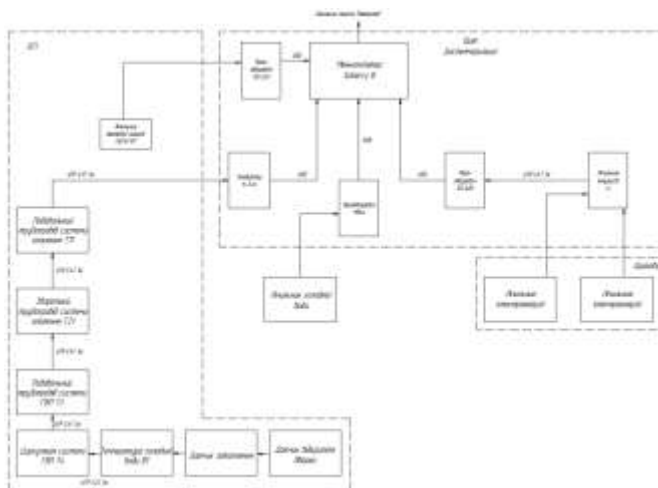


Рис. 2. Структурна схема системи енергомоніторингу

Основним каналом передачі даних енергоспоживання та температури до центрального серверу є провідна мережа Інтернет, що влаштована на об'єкті. В якості резервного каналу передбачається використання GSM/GPRS.

Шлюз LoRa (LoRa Gateway) використовується як ключовий елемент в архітектурі мережі LoRa — це бездротова технологія зв'язку для Інтернету речей, що дозволяє передавати дані на великі відстані з низьким енергоспоживанням. Він призначений для приймання радіосигналів від кінцевих пристроїв (сенсорів, лічильників, трекерів тощо) і передачі цих даних до хмарного сервера через інтернет (через Wi-Fi, Ethernet або мобільну мережу).

Таким чином, із застосуванням мінімально необхідної кількості датчиків буде отримуватись, накопичуватись і аналізуватись інформація про споживання енергоносіїв будівлі. Система в майбутньому може масштабуватись і контролювати більшу кількість будівель і датчиків.

Система вимагає кваліфікованого підходу, тому підвищення кваліфікації обслуговувального персоналу є необхідною умовою для отримання максимального ефекту від впровадження.

Висновки

На основі проведеного аналізу можемо зробити такі висновки.

1. Типова схема енергомоніторингу в громадській будівлі має розвиватися від простого регулярного збору показників до інтегрованої системи управління енергією.

2. На старті достатньо ручної або напівавтоматизованої моделі, але для великих, енергоємних або технічно складних об'єктів доцільно переходити до розподільного та автоматизованого обліку.

3. Ключовою умовою ефективності є не кількість датчиків, а наявність повного циклу: дані → аналіз → відповідальна дія → перевірка результату → коригування.

4. Для якісної реалізації системи моніторингу потрібні не лише кошти, а й навчений кваліфікований персонал.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Авторами статті публічно підтверджується, що дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Zakon Ukrainy Pro enerhetychnu efektyvnist. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20/print>.
2. Enerhomenedzhment u budivliakh. URL: <https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/practicii-posibnik-z-energhomenedzhmentu-ee-u-budivliax.pdf>
3. Serhii Savchuk: Zavdiaky enerhomenedzhmentu mozna zmenshyty enerhospozhyvannia u biudzhetnykh zakladakh do 20% i bez kapitalovkladen. URL: <https://sae.gov.ua/news/sergii-savcuk-zavdiaki-energhomenedzhmentu-mozna-zmensiti-energhospozhyvannia-u-biudzhetnix-zakladax-do-20-i-bez-kapitalovkladen>.
4. DSTU ISO 50001:2020 Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymohy ta nastanova shchodo vykorystannia (ISO 50001:2018, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90178.
5. Buildings. How and where is energy used? URL: https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/buildings?utm_source.
6. Pro vprovadzhennia system enerhetychnoho menedzhmentu. Postanova kabinetu ministriv Ukrainy vid 23 hrudnia 2021 r. № 1460. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-n>.
7. Baytelman, Y. (Jacob) ., & Potsepaiev, V. (2024). DEVELOPMENT OF A CONTENT MANAGEMENT SYSTEM AND ITS CLOUD DEPLOYMENT. Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: «Computer Engineering and Automation», 2(2(34)), 14–31. [https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i2\(34\).313761](https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i2(34).313761)
8. Shybetskyi, B., & Dorohyi, I. (2024). SYSTEM FOR MONITORING AND ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION IN HOUSEHOLDS BASED ON IOT TECHNOLOGIES. Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: “Computer Engineering and Automation”, 2(3(35)), 18–28. [https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i3\(35\).316438](https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i3(35).316438)
9. Yavorskyi , A. V., Tsykh, V. S., Karpash , M. O., & Zhovtulia , L. Ya. (2022). INFORMATsIIINO-VYMIRIuVALNA SYSTEMA MONITORYNHU SPOZhYVANNIA ENERHORESURSIV DLIa BUDIVLI UNIVERSYTETU. METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL, (2(49)), 46–57. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2022-2\(49\)-46-57](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2022-2(49)-46-57)
10. Razinkov V.O. (2025) Analiz problem funktsionuvannia systemy enerhomonitorynhu komunalnogo sektoru. Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. 2025. № 43 (119), 28–33. <https://doi.org/10.15276/eltecs.43.119.2025.3>

11. V. Nakhodov, A. Baskys, E. Borichenko, D. Ivanko. Application of sequential analysis of Wald for energy efficiency monitoring. 2016 IEEE 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE 2016 – 10-12 Nov. 2016 Vilnius, Lithuania, DOI: 10.1109/AIEEE.2016.7821823.
12. V. Nakhodov, O. Borychenko, A. Cherniavskiy. THE METHODOLOGICAL ISSUES OF INDUSTRIAL ENERGY MONITORING SYSTEMS IMPLEMENTATION. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 3 (2020): 61–47-56. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2020.228616>.

Література

1. Закон України Про енергетичну ефективність. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20/print>.
2. Енергоменеджмент у будівлях. URL: <https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/prakticnii-posibnik-z-energomenedzmentu-ee-u-budivliax.pdf>.
3. Сергій Савчук: Завдяки енергоменеджменту можна зменшити енергоспоживання у бюджетних закладах до 20% і без капіталовкладень. URL: <https://sae.gov.ua/news/sergii-savchuk-zavdiaki-energomenedzmentu-mozna-zmensiti-energospozivannia-u-biudzetnix-zakladax-do-20-i-bez-kapitalovkladen>.
4. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2018, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90178.
5. Buildings. How and where is energy used? URL: https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/buildings?utm_source.
6. Про впровадження систем енергетичного менеджменту. Постанова кабінету міністрів України від 23 грудня 2021 р. № 1460. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-п>.
7. Baytelman, Y. (Jacob) ., & Potsepaiev, V. (2024). DEVELOPMENT OF A CONTENT MANAGEMENT SYSTEM AND ITS CLOUD DEPLOYMENT. Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: «Computer Engineering and Automation», 2(2(34)), 14–31. [https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i2\(34\).313761](https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i2(34).313761)
8. Shybetskyi, B., & Dorohyi, I. (2024). SYSTEM FOR MONITORING AND ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION IN HOUSEHOLDS BASED ON IOT TECHNOLOGIES. Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: “Computer Engineering and Automation”, 2(3(35)), 18–28. [https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i3\(35\).316438](https://doi.org/10.31474/2786-9024/v2i3(35).316438)
9. Яворський , А. В., Цих, В. С., Карпаш , М. О., & Жовтуля , Л. Я. (2022). ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ ДЛЯ БУДІВЛІ УНІВЕРСИТЕТУ. METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL, (2(49)), 46–57. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2022-2\(49\)-46-57](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2022-2(49)-46-57)

10. Разінков В.О. (2025) Аналіз проблем функціонування системи енергомоніторингу комунального сектору. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2025. № 43 (119), 28-33. <https://doi.org/10.15276/eltecs.43.119.2025.3>

11. V. Nakhodov, A. Baskys, E. Borichenko, D. Ivanko. Application of sequential analysis of Wald for energy efficiency monitoring. 2016 IEEE 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE 2016 – 10-12 Nov. 2016 Vilnius, Lithuania, DOI: 10.1109/AIEEE.2016.7821823.

12. V. Nakhodov, O. Borychenko, A. Cherniavskiyi. THE METHODOICAL ISSUES OF INDUSTRIAL ENERGY MONITORING SYSTEMS IMPLEMENTATION. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 3 (2020): 61 47-56. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2020.228616> .

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 15.05.2026	Received 15.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 24.05.2026	Received in revised form 24.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. A. Pakholiuk*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0650-6446>
Department of Building and Infrastructure Engineering

I.O. Bandura

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2166-4909>
Department of Electrical Engineering
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska, st., Lutsk 43018, Ukraine

V.S. Dovbenko*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9575-2931>
Energy Efficiency Center of NUWEE
National University of Water and Environmental Engineering, 11 Soborna St., Rivne, Ukraine, 33000

*corresponding author, e-mail: orest.pakholiuk@gmail.com

Energy monitoring in public buildings

How to Cite:

Pakholiuk O. A., Bandura I.O., Dovbenko V.S. (2026). Energy monitoring in public buildings. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, 25, 429-443. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-32](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-32)

Abstract. The article considers energy monitoring in public buildings as a tool for systematic management of energy consumption, operational efficiency and justification of energy efficiency measures. It is shown that energy management and energy monitoring form an organizational, analytical and regulatory basis for the transition from episodic control to continuous energy management. The legislative prerequisites for the implementation of energy management systems in Ukraine, their

significance for local governments, budget institutions and technical modernization of facilities are analyzed. Six typical energy monitoring schemes are identified: basic manual or semi-automated, a scheme with distributed accounting, an automated scheme, a microclimatic monitoring scheme, an analytics and management response scheme, as well as a model integrated into the logic of ISO 50001 and the PDCA cycle. The scope of application, data composition, possibilities for detecting deviations, management value and limitations are outlined for each scheme. It is substantiated that the effectiveness of energy monitoring is determined not so much by the level of automation as by the presence of the full cycle of “data - analysis - decision - action - result verification - adjustment”. It is shown that even with limited funding, it is possible to gradually implement a monitoring system from simple collection of indicators to an expanded digital platform. It is concluded that system energy monitoring allows you to identify inefficient consumption, assess the effect of measures, prioritize investments, increase user comfort and form an evidence base for management decisions. Special attention should be paid to staff training. It is separately emphasized that for large, energy-intensive and technically complex facilities, it is advisable to switch to distributed and automated metering, while for institutions with limited resources, a simplified model with regular measurement of indicators and subsequent analysis can be the starting point. It has been proven that the key condition for effectiveness is the availability of trained personnel and managerial response to identified deviations for budgetary institutions.

Keywords: energy monitoring; energy management; public buildings; automated accounting; ISO 50001.

З М І С Т

В.А. Пашинський, М.В. Пашинський	Аналіз конструктивних параметрів і вагових характеристик сталевих балок з гнучкою стінкою.....	5
А.С. Величкович, А.В. Андрусяк, Ю.В. Олевич	Експрес-оцінка вибухостійкості шаруватих пластин для захисних екранів і облицювань.....	18
С.І. Пустюльга, В.П. Самчук, Ю.С. Бондарчук, М.В. Заразка	Дискретно-воксельна оптимізація параметричних моделей міської інфраструктури.....	35
А.С. Лапченко	Порівняння послідовної та паралельної схем електродетонаторних мереж при проходженні тунелів.....	53
О.Ю. Єрмоєнко, С.В. Стоянович	Порівняльний аналіз чисельних методів розрахунку гнучких фундаментних плит на пружній основі з урахуванням геометричної нелінійності.....	66
О.І. Кротюк, Л.Й. Дворкін	Ефективність комплексної добавки на основі суперпластифікатора та інтенсифікатора помелу для тампонажного цементу.....	76
В.І. Анін, Д.О. Фостащенко	Удосконалення організаційно-технологічних процесів у сфері інфраструктурного будівництва із застосуванням системного підходу.....	88
О.П. Конончук	Напружено-деформований стан залізобетонних надпідвальних перекриттів корівників після зміни режиму завантаження	102
І.В. Кобилко	Симультанна нітрифікація-денітрифікація в SBR з плаваючими EPS-носіями для молочних стічних вод.....	115

О.С. Коваленко	Багатокритеріальна математична модель оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві.....	124
А.О. Атинян, І.В. Шумаков, А.Р. Ібрагімов, О.А.Гвоздюк, О.М. Пустовойтова	Аналіз організаційно-технологічних рішень із використанням інноваційних матеріалів при відновленні мостових споруд.....	140
Г.О. Татарченко, Д.М. Безпалій	Оцінка енергоефективності та принципів Smart City на повному життєвому циклі будівель.....	153
Н.І. Білошицька, М.В. Білошицький, П.Є. Уваров	Концептуальні засади та напрями ревіталізації промислових і депресивних територій українських міст у контексті сталого розвитку.....	165
В.Л. Расюн, О.В. Мельник, В.Ф. Радзій	Інтеграція даних Sentinel-2 та платформи Google Earth Engine для просторово-часового моніторингу територій торфовидобутку.....	178
О.А. Овчаренко, В.С. Фітаров	Порівняльний аналіз універсальних програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання.....	197
В.О. Процюк, І.М. Ясюк, О.П. Шимчук, М.В. Бодак	Обґрунтування параметрів світлофорного регулювання, як інженерного облаштування вулиць і доріг для організації дорожнього руху на міській вулиці.....	213
І.О. Парфентьева, Ю.А. Мельник, М.Р. Новосад, О.В. Верешко, П.О. Сунак	Методи реконструкції зелених зон у житлових кварталах щільної забудови: інклюзивний підхід (на прикладі кварталу Гуца в м. Луцьку).....	226
О.Г. Добровольська, О.М. Фостащенко	Удосконалена методика реконструкції інженерного обладнання індивідуальних будинків, пошкоджених внаслідок воєнних дій.....	238

О.Т. Гнатюк, Ю.М. Фабрика	Технічне обстеження несучих конструкцій полігонального сталевого флагштока на площі Б. Хмельницького у місті Ужгороді.....	254
І.С. Чернов, Е.А. Дармофал, І.О. Кадикало	Методи оцінки технічного стану будівель після екстремальних впливів.....	265
I. A. Arutiunian, K. M. Mishuk, Y. E. Arutiunian	Enhancing the compressive strength of soil-cement piles via drill string kinematics optimization in deep mixing.....	284
В.Б. Ігнат'єва	Веломобіль як елемент інноваційної транспортної системи міста.....	297
Т.Н. Азізов, О.Ф. Майстренко, М.С. Балакан	До розрахунку збірно-монолітних тонкостінних залізобетонних склепінь, що виготовляються без застосування опалубки....	311
О.М. Лукін, Д.О. Лукін	Статичні випробування автодорожніх мостів. ДСТУ 9280:2024 – новий підхід.....	326
Ю.Ю. Зятюк, О.М. Поліщук	Ефективність застосування фібрового армування та модифікуючих добавок у бетоні для жорсткого дорожнього одягу.....	338
В.В. Петров	Сучасні конструктивні системи для будівництва ЗЗСО із захисними спорудами: матеріали, технології.....	350
Л.М. Піліпака	Метод скінченних міських модулів як інструмент моделювання та розрахунку містобудівних систем.....	367
О.П. Єфімов, Л.В. Гапонова	Алгоритмічна еволюція конструкцій та шлях від моноліту до біонічного дизайну через топологічну оптимізацію.....	377
О.О. Горюн	Перспективи застосування імпульсної технології для модифікації бетонних і	

	цементних виробів.....	386
К.М. Березька, О.С. Шевчук, М.В. Буряк, Ю.О. Рутецький	Методика ранжування дорожніх сегментів міської мережі на основі показників завантаження та середньої швидкості в ранковий і вечірній піки.....	401
С.В. Пастухова	Багатокритеріальний синтез організаційно- технологічних рішень при зведенні енергозберігаючих цивільних будівель.....	416
О.А. Пахолук, І.О. Бандура, В.С. Довбенко	Енергомоніторинг у громадських будівлях...	429

Наукове видання

Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві

Збірник наукових праць

Випуск 25

Видається два рази на рік

Верстка І. Ясюк

Підписано до друку 27.05.2026 р. Формат 60 × 84 1/16.
Папір офсетний. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 28,0.
Тираж 100 пр. Зам. № _____
Віддруковано з готового оригінал-макета.

Видавництво – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1
Телефони: +38(095)9344828, +38(097)7230608
E-mail: mailbox@helvetika.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

