

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
ІНІ «ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

**УКРАЇНСЬКИЙ  
ЖУРНАЛ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ**

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

**№ 3 (033)**  
Травень – Червень 2026

Дніпро 2026

## **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

Головний редактор **Микола САВИЦЬКИЙ**, д-р техн. наук, УДУНТ, Дніпро  
Заступник головного редактора **Владислав ДАНИШЕВСЬКИЙ**, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро  
Відповідальний секретар та випусковий редактор **Олена ТИМОШЕНКО**, к-т техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро

## **ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:**

**А. С. Беліков**, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. **В. Є. Волкова**, д-р техн. наук, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро. **Д. Л. Волчок**, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. **Ю. І. Криворучко**, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. **О. М. Кульбака**, к-т техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. **Д. М. Леонтєв**, д-р техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків. **А. А. Москаленко**, к-т техн. наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ. **В. І. Проскуряков**, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. **О. В. Третяков**, д-р техн. наук, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ. **Набі Ібадов**, к-т техн. наук, Варшавський Політехнічний Університет, Польща. **Павел Вольний**, к-т техн. наук, Лодзький Політехнічний Університет, Польща. **Роман Рабенсейфер**, д-р техн. наук, Словацький технічний університет в Братиславі, Словаччина

Науково-практичний журнал входить до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук та архітектури за спеціальностями 132, 191, 192, 194, 263 згідно з наказом Міністерства освіти і науки України від 09.02.2021 № 157 (Додаток 3).

Свідоцтво про Державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації – серія КВ № 24586-14526 ПР – видане Міністерством юстиції України 09 жовтня 2020 р.

Засновник та видавець Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (код за ЄДРПОУ 02070772).

Виходить 6 разів на рік.

Рекомендовано до друку вченою радою «Українського університету науки та технологій» протокол № 9 від 27.05.2026.

Сайт видання <https://uajcea.pgasa.dp.ua>

Наукометричні бази та електронні бібліотеки, в яких зареєстрований науково-практичний журнал **DOAJ (Довідник журналів відкритого доступу)**, *Інформаційно-аналітичні системи*: InfoBase Index (IBI Factor = 3,96), Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory, Indexing of International Research Journals (CiteFactor). *Електронні бібліотеки та пошукові системи*: Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського

ISSN 2710-0367 (Print)  
2710-0375 (Online)

Художній і технічний редактор **Сергій МОЙСЄНКО**  
Редактор та коректор **Олена ТИМОШЕНКО**

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES  
ESI “PRYDNIPROVSKA STATE ACADEMY  
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE”**

# **UKRAINIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE**

**SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL**

**№ 3 (033)**  
May – June 2026

**Dnipro 2026**

## **EDITORIAL STAFF :**

*Chief Editor*                    **Mykola SAVYTSKYI**, Doctor of Engineering Science, *USUST, Dnipro*  
*Deputy Chief Editor*        **Vladyslav DANISHEVSKYY**, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*  
*Executive Secretary & Executive Editor*        **Olena TYMOSHENKO**, Candidate of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*

## **MEMBERS OF EDITORIAL STAFF :**

**A.S. Bielikov**, Doctor of Engineering Sciences, *ESI “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture” (ESI PSACEA), Dnipro*. **V.Yev. Volkova**, Doctor of Engineering Science, *Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro*. **D.L. Volchok**, Doctor of Engineering Sciences, *ESI PSACEA, Dnipro*. **Yu.I. Kryvoruchko**, Doctor of Architecture, *National University “Lviv Polytechnic”, Lviv*. **O.M. Kulbaka**, Candidate of Engineering Sciences, *ESI PSACEA, Dnipro*. **D.M. Leontiev**, Doctor of Engineering Sciences, *Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv*. **A.A. Moskalenko**, Candidate of Engineering Sciences, *National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv*. **V.I. Proskuriakov**, Doctor of Architecture, *National University “Lviv Polytechnic”, Lviv*. **O.V. Tretiakov**, Doctor of Engineering Sciences, *National University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv*. **Nabi Ibadov**, Candidate of Engineering Sciences, *Warsaw University of Technology, Poland*. **Pawel Wolny**, Candidate of Engineering Sciences, *Lodz University of Technology, Poland*. **Roman Rabenseifer**, Doctor of Engineering Sciences, *Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia*

Scientific-Practical Journal is included in	List of scientific professional publications of Ukraine (category “B”), where the results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Engineering Sciences and Architecture (by specialty 132, 191, 192, 194, 263) can be published according to the Resolution of the Ministry of Science and Education of Ukraine No. 157 dated 09.02.2021 (Appendix no. 3).
Certificate of State Registration	of the Print Media – Series KB No. 24586-14526 PIP – issued by the Ministry of Justice of Ukraine dated October 09, 2020.
Founder & Publisher	State Higher Education Institution “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture”.  Issued 6 times a year.
Recommended for publication by	Academic Board of the Ukrainian State University of Science and Technologies, no. 9 from 27.05.2026
Journal website	<a href="https://uajcea.pgasa.dp.ua">https://uajcea.pgasa.dp.ua</a>
Placement of the scientific-practical journal in the international scientometric databases and e-libraries	<b>DOAJ (Directory of Open Access Journals)</b> , <i>Information and analytical systems: InfoBase Index (IBI Factor = 3.96), Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory Indexing of International Research Journals (CiteFactor). Electronic Libraries and search engines: Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OCLC WorldCat, Open Journal Systems, V.I. Vernadskyi National Library of Ukraine</i>
ISSN	2710-0367 (Print) 2710-0375 (Online)

*Art & Technical Editor* **Serhii MOISEIENKO**  
*Editor & Proofreader* **Olena TYMOSHENKO**

## У ЦЬОМУ НОМЕРІ

<b>Безверхий Д. С.</b> ШАРУВАТІ БЕТОННО-ГУМОВІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ ВІД ВІБРАЦІЙ ТА СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	7
<b>Бєліков А. С., Мацук З. М., Руденко В. П., Атанєсян А. А.</b> ОБМЕЖЕННЯ ЧИННОГО РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	16
<b>Білоконь А. І., Кислиця Л. В., Іванчак С. В.</b> КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ СТРУКТУРНИХ РІШЕНЬ СТАЛЕВИХ ПРОМИСЛОВИХ БУДІВЕЛЬ.....	30
<b>Біляєв М. М., Гільов В. В., Кіріченко П. С., Козачина В. А., Тимошенко О. А.</b> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ТА МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗАХИСНОГО ЕКРАНУ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ.....	39
<b>Воробйов В. В., Шило О. С.</b> МІСТО ЯК ПАРАДОКС.....	45
<b>Данішевський В. В., Кучин І. О.</b> ДВОВИМІРНІ БЕТОННО-ГУМОВІ ПЕРІОДИЧНІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ ВІД ВІБРАЦІЙ ТА СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	62
<b>Дейнеко Л. М., Кривчик Л. С., Пінчук В. Л., Столбовий В. О.</b> ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ІОННО-ПЛАЗМЕНОГО АЗОТУВАННЯ ВТОРИННОТВЕРДЮЮЧИХ ШТАМПОВИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБНОГО ІНСТРУМЕНТУ.....	68
<b>Ковалишин В. В., Марич В. М., Фірман В. М., Гаман Б. В.</b> ПРОБЛЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ЗА НАЯВНОСТІ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ.....	88
<b>Кулік М. В., Іваненко Д. С., Іщенко О. Л., Щербина С. О.</b> СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА ВИКОРИСТАННЯ ДОЩОВОЇ ВОДИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД РАЦІОНАЛЬНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ.....	99
<b>Кушнір І. О., Волкова В. Є.</b> ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КАРКАСУ КАПСУЛЬНОГО БУДИНКУ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ.....	108
<b>Нєсєвря П. І., Нєчєпурєнко Д. С., Даниленко І. О.</b> ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ СПОСОБУ СПОРУДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ СТІН БУДІВЕЛЬ МОНОЛІТНО-КАРКАСНОЇ КОНСТРУКЦІЇ.....	116
<b>Нєчитайло М. П., Нагорна О. К., Нєстерова О. В., Нєчитайло М. М., Чернова Є. О.</b> ХІМІЧНИЙ СКЛАД ТА МОЛЕКУЛЯРНІ МЕХАНІЗМИ ДІЇ АНТИСКАЛАНТІВ ДЛЯ СИСТЕМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ: ФУНДАМЕНТАЛЬНІ АСПЕКТИ.....	122
<b>Нікіфорова Т. Д., Федін В. А.</b> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ НА ЗГИН ДЕРЕВОЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПАНЕЛІ ПЕРЕКРИТТЯ.....	128
<b>Пахомов М. В., Заяць Є. І.</b> ВИЗНАЧЕННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ОЗНАК БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО НАГЛЯДУ У КАРКАСНО-МОНОЛІТНОМУ БУДІВНИЦТВІ.....	136
<b>Шаломов В. А., Дємченко В. В., Жирков В. Ю., Хряп П. Д.</b> ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЕКЗОСКЕЛЕТАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ В БУДІВНИЦТВІ ТА НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	148
<b>Яровий С. М., Черєдник Д. Л., Титюк А. О., Данильченко О. О.</b> СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДЕФЕКТІВ ТА ПОШКОДЖЕНЬ МЕТАЛЕВИХ НЕСУЧИХ ВЕЖ ДИМОВИХ ТРУБ ТА ЇХ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИ ЗНАЧЕННЯ.....	157
<b>Сопільняк А. М., Сіренєк К. О.</b> ПІДГОТОВЧИЙ ЕТАП БУДІВНИЦТВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ.....	165

## CONTENT

<b>Bezverkhyi D.S.</b> CONCRETE-RUBBER LAYERED STRUCTURES FOR THE PROTECTION OF BUILDINGS FROM VIBRATIONS AND SEISMIC LOADS.....	7
<b>Bielikov A.S., Matsuk Z.M., Rudenko V.P., Atanesian A.A.</b> LIMITATIONS OF THE CURRENT RISK-ORIENTED APPROACH TO ENSURING CRITICAL INFRASTRUCTURE SECURITY.....	16
<b>Bilokon A.I., Kyslytsia L.V., Ivanchak S.V.</b> CONCEPTUAL PLANNING OF STRUCTURAL SOLUTIONS FOR STEEL INDUSTRIAL BUILDINGS.....	30
<b>Biliaiev M.M., Hilov V.V., Kirichenko P.S., Kozachyna V.A., Tymoshenko O.A.</b> EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF AERODYNAMICS AND MASS TRANSFER USING A PROTECTIVE SCREEN OF COMPLEX GEOMETRIC SHAPE.....	39
<b>Vorobiov V.V., Shylo O.S.</b> THE CITY AS A PARADOX.....	45
<b>Danishevskyy V.V., Kuchyn I.O.</b> TWO-DIMENSIONAL CONCRETE-RUBBER PERIODIC STRUCTURES FOR THE PROTECTION OF BUILDINGS AGAINST VIBRATION AND SEISMIC LOADS.....	62
<b>Deineko L.M., Kryvchik L.S., Pinchuk V.L., Stolbovyi V.O.</b> FEATURES OF ION-PLAZA NITRIDING TECHNOLOGIES OF SECONDARY-HARDENING STAMP STEELS FOR MANUFACTURING TUBE TOOLS.....	68
<b>Kovalyshyn V.V., Marych V.M., Firman V.M., Haman B.V.</b> PROBLEMS OF FIRE EXTINGUISHING IN THE PRESENCE OF LITHIUM-ION BATTERIES.....	88
<b>Kulik M.V., Ivanenko D.S., Ishchenko O.L., Shcherbyna S.O.</b> RAINWATER HARVESTING SYSTEMS AS AN EFFECTIVE METHOD OF SUSTAINABLE WATER SUPPLY UNDER MARTIAL LAW CONDITIONS.....	99
<b>Kushnir I.O., Volkova V.Yev.</b> NUMERICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF CAPSULE HOUSE FRAME UNDER OPERATIONAL LOADS AND SUBSTANTIATION OF PROFILE THINNING.....	108
<b>Nesevria P.I., Nechepurenko D.S., Danylenko I.O.</b> PROBLEM STATEMENT ON THE EXTERIOR WALL ERECTION METHODS IN REINFORCED CONCRETE FRAME BUILDINGS.....	116
<b>Nechytailo M.P., Nahorna O.K., Nesterova O.V., Nechytailo M.M., Chernova Yev.O.</b> CHEMICAL COMPOSITION AND MOLECULAR MECHANISMS OF ACTION OF ANTISCALANTS FOR REVERSE OSMOSIS SYSTEMS: FUNDAMENTAL ASPECTS.....	122
<b>Nikiforova T.D., Fedin V.A.</b> EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BENDING STRENGTH OF A TIMBER CONCRETE COMPOSITE FLOOR PANEL.....	128
<b>Pakhomov M.V., Zaiats Yev.I.</b> DETERMINATION OF CLASSIFICATION CHARACTERISTICS OF BUILDING OBJECTS FOR OPTIMIZING TECHNICAL SUPERVISION IN FRAME-MONOLITHIC CONSTRUCTION.....	136
<b>Shalomov V.A., Demchenko V.V., Zhyrkov V.Yu., Khriap P.D.</b> APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN EXOSKELETONS TO IMPROVE LABOUR SAFETY IN CONSTRUCTION AND CRITICAL INFRASTRUCTURE.....	148
<b>Yarovij S.M., Cherednik D.L., Tytiuk A.O., Danylchenko O.O.</b> STATISTICAL ANALYSIS OF DEFECTS AND DAMAGES OF METAL SUPPORTING TOWERS OF CHIMNEY PIPES AND THEIR LIMITS.....	157
<b>Sopilniak A.M., Sirenok K.O.</b> PREPARATORY STAGE OF CONSTRUCTION USING 3D PRINTING TECHNOLOGY.....	165

УДК 624.042.7:550.34

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.7.1238

## ШАРУВАТІ БЕТОННО-ГУМОВІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ ВІД ВІБРАЦІЙ ТА СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

БЕЗВЕРХИЙ Д. С., *асп.*

Кафедра будівельної механіки та металевих конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 152-67-98, e-mail: [bezup.inc@gmail.com](mailto:bezup.inc@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-0576-4152>

**Анотація.** У статті розглянуто актуальну проблему сейсмічного захисту будівель і інженерних споруд із особливим акцентом на використанні періодичних матеріалів для розроблення інноваційних систем сейсмоізоляції та віброзахисту. Зазначено, що традиційні рішення сейсмоізоляції, зокрема гумометалеві опори, мають низку обмежень, таких як значні відносні переміщення під час сильних сейсмічних впливів, можливе погіршення характеристик з часом, а також недостатня ефективність у вертикальному напрямку. Цей недолік є особливо критичним для об'єктів підвищеної відповідальності, зокрема конструкцій атомних електростанцій, де вертикальна складова сейсмічної дії суттєво впливає на безпеку споруди [1]. У статті досліджено потенціал періодичних матеріалів і інженерних конфігурацій фундаментів, здатних формувати заборонені зони для сейсмічних хвиль у визначених діапазонах частот, що дає змогу послаблювати або блокувати їх поширення в ґрунтовому масиві та фундаментній системі. Особливу увагу приділено проектуванню, чисельному моделюванню одновимірних і двовимірних періодичних фундаментів, а також оцінюванню їхньої роботи за різних сценаріїв збудження. Наведено результати випробувань на вібростендах і в польових умовах, які підтверджують ефективність таких систем у зниженні динамічних навантажень, амплітуд коливань та передавання енергії на надземні конструкції. **Мета статті** полягає у всебічному аналізі теоретичних, чисельних і експериментальних досліджень у галузі періодичних матеріалів для створення систем сейсмоізоляції, що потребують мінімального або взагалі не потребують постійного обслуговування та забезпечують суттєве зменшення відносних переміщень. Зокрема, дослідження зосереджене на верифікації базової теорії, уточненні ключових параметрів проектування та визначенні умов, за яких такі системи досягають максимальної ефективності в практичних застосуваннях. **Висновок.** Проведений аналіз підтверджує, що періодичні фундаменти є перспективним та ефективним підходом до зменшення пошкоджень конструкцій від сейсмічних збуджень. Отримані результати можуть бути використані для розроблення практичних рекомендацій, розрахункових методик і проектних настанов щодо впровадження цієї інноваційної технології в практику цивільного будівництва [2].

**Ключові слова:** сейсмічний захист; метаматеріали; фононний кристал; періодичні конструкції; заборонена зона; сейсмічне екранування; сейсмоізоляція

## CONCRETE-RUBBER LAYERED STRUCTURES FOR THE PROTECTION OF BUILDINGS FROM VIBRATIONS AND SEISMIC LOADS

BEZVERKHYY D.S., *Postgrad. Stud.*

Department of Structural Mechanics and Metal Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 152-67-98, e-mail: [bezup.inc@gmail.com](mailto:bezup.inc@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-0576-4152>

**Abstract.** The article addresses the pressing problem of seismic protection for buildings and engineering structures, with a special emphasis on the use of periodic materials to develop innovative seismic isolation and vibration mitigation systems. It is noted that conventional seismic isolation solutions, including rubber – metal bearings, have several limitations, such as large relative displacements under strong ground motions, potential degradation over time, and insufficient effectiveness in the vertical direction. This shortcoming is particularly critical for high-responsibility facilities, including nuclear power plant structures, where vertical seismic components can significantly influence structural safety [1]. The article explores the potential of periodic materials and engineered foundation configurations capable of creating band gaps for seismic waves within specific frequency ranges, thereby attenuating or blocking their propagation through the soil and the foundation system. Special attention is devoted to the design, numerical modeling of one-dimensional and two-dimensional periodic foundations, as well as to evaluating their performance under different

excitation scenarios. The results of shake-table tests and field experiments are reviewed, confirming the effectiveness of such systems in reducing dynamic loads, vibration amplitudes, and energy transfer to superstructures. **The purpose of the article** is to provide a comprehensive analysis of theoretical, numerical, and experimental research on periodic materials aimed at developing seismic isolation systems that require minimal or no continuous maintenance while significantly reducing relative displacements. In particular, the study focuses on validating the underlying theory, refining key design parameters, and identifying the conditions under which these systems achieve maximum efficiency in practical applications. **Conclusion.** The analysis confirm that periodic foundations represent a promising and effective approach for mitigating structural damage caused by seismic excitations. The research findings can be used to develop practical recommendations, calculation procedures, and design guidelines for implementing this innovative technology in civil engineering practice [2].

**Keywords:** seismic protection; metamaterials; phononic crystal; periodic structures; band gap; seismic shielding; seismic isolation

**Вступ.** Інженери вже багато років досліджують проектування будівель і споруд, стійких до землетрусів, але досі не існує універсально визнаного методу сейсмічного проектування. Водночас традиційні підходи поступово замінюються новішими методологіями, які враховують пластичність елементів конструкції та важливість опору ковзанню під час проектування споруд, здатних витримувати динамічні навантаження, пов'язані із землетрусами. Для підвищення здатності споруди чинити опір землетрусу та зберігати працездатність запропоновано й упроваджено різні пасивні й активні системи. Одна зі стратегій полягає у застосуванні системи базової ізоляції, яка може змінювати власну частоту споруди та зменшувати її реакцію на прискорення [3-5].

Нещодавні дослідження у фізиці твердого тіла показали, що періодичні матеріали, або фононні кристали, можна спроектувати так, щоб вони утворювали заборонені частотні зони, які перешкоджають поширенню хвильової енергії крізь конструкцію, коли частотний вміст хвилі потрапляє в певний частотний діапазон. Цю ідею використали для розроблення нового методу сейсмічної базової ізоляції: як основу застосовують періодичний матеріал, щоб повністю блокувати або змінювати структуру сейсмічної енергії, що надходить до споруди. Такий підхід може бути особливо корисним для об'єктів, у яких розміщене обладнання, чутливе до вібрацій [2; 6].

У статті розглянуто одновимірний випадок – шарувату фундаментну систему з коміркою (елементарним осередком),

утвореною двома різними матеріалами, наприклад гумою та бетоном [7]. Ширину забороненої частотної зони в періодичному фундаменті досліджували методом Блоха-Флоке, а також виконали параметричне дослідження з метою отримати вужчу заборонену частотну зону [8]. Ці концепції застосували до сталевого каркаса на періодичному фундаменті й встановили, що за рахунок такого фундаменту вібрації можна суттєво послабити [3]. Якщо цей підхід виявиться практичним для цивільних споруд, він може мати значний вплив на економічні та безпекові аспекти будівництва [7].

**Аналітичний розв'язок.** Розглянемо одновимірну шарувату періодичну основу з почерговими шарами двох ізотропних матеріалів, розташованими так, як показано на рисунку 1.

Для заданої системи координат будь-які два сусідні шари утворюють елементарну комірку, інваріантну щодо трансляції вздовж напрямку поширення хвилі. Хвильовий процес у такому середовищі подамо у вигляді:

$$u = Ae^{i\omega t} e^{i\mu x}, \quad (1)$$

де  $\omega$  - кутова частота хвилі,  $t$  - час,  $\mu$  - хвильове число Блоха,  $x$  - просторова координата. Хвильове число пов'язане з довжиною хвилі  $L$  співвідношенням:

$$\mu = \frac{2\pi}{L}. \quad (2)$$

Хвильове число  $\mu$  необхідне для опису дисперсійної залежності, яка пов'язує частоту  $\omega$  з хвильовим числом  $\mu$ . Саме

дисперсійна залежність визначає характер поширення хвиль у періодичній структурі та наявність заборонених частотних зон.

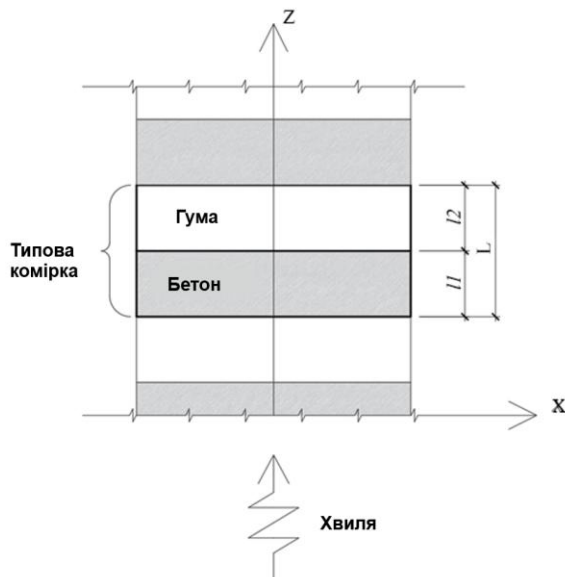


Рис. 1. Шаруватий композит

Рівняння (3) представляє реальну форму дисперсійної залежності для поперечної хвилі (S-хвилі) в неоднорідному періодичному середовищі. Воно виведене на основі хвильового рівняння (1) і періодичних граничних умов із застосуванням методу Флоке-Блоха [8]. Дисперсійна залежність пов'язує кутову частоту  $\omega$  та хвильове число  $\mu$ .

$$\cos(\mu l) = \cos(\mu^{(1)} l_1) \cos(\mu^{(2)} l_2) - \frac{1}{2} \left( \frac{z^{(1)}}{z^{(2)}} + \frac{z^{(2)}}{z^{(1)}} \right) \sin(\mu^{(1)} l_1) \sin(\mu^{(2)} l_2) \quad (3)$$

де  $z^{(1,2)} = \sqrt{E^{(1,2)} \rho^{(1,2)}}$  – імпеданс компонентів,  $\mu^{(1,2)} = \omega \sqrt{\frac{\rho^{(1,2)}}{E^{(1,2)}}}$  – хвильове число, яке залежить від густини та модуля Юнга матеріалів,  $l_{1,2}$  – товщини шарів.

Дисперсійна залежність показує, що Заборонена частотна зона виникає тоді, коли значення правої частини рівняння (3) виходить за межі інтервалу  $[-1; 1]$ . У такому разі хвильове число Блоха стає комплексним:

$$\mu = \mu_{\text{Re}} + i\mu_i, \quad (4)$$

де  $\mu_{\text{Re}} = \text{Re}(\mu)$  – дійсна частина хвильового числа,  $\mu_i = \text{Im}(\mu)$  – уявна частина хвильового числа.

Підставляючи (4) у (1), отримаємо:

$$u = A e^{-\mu_i x} e^{i\omega t} e^{i\mu_{\text{Re}} x}. \quad (5)$$

Із формули (5) видно, що множник  $e^{-\mu_i x}$  описує експоненційне згасання амплітуди хвилі в просторі, тому  $\mu_i$  є коефіцієнтом згасання. У смугах пропускання  $\mu_i = 0$ , і хвиля поширюється без експоненційного згасання. У заборонених частотних зонах  $\mu_i > 0$ ; для хвилі, що згасає вздовж додатного напрямку осі  $x$ , приймають  $\mu_i > 0$ .

Таким чином, у забороненій частотній зоні хвиля не переносить енергію в режимі поширення, а згасає в просторі за експоненційним законом. Завдяки цьому періодична структура ефективно послаблює вібраційний вплив.

Розв'язуючи рівняння (3), можна отримати явний вираз для хвильового числа Блоха:

$$\mu = \frac{1}{l} \arccos \left( \cos(\mu^{(1)} l_1) \cos(\mu^{(2)} l_2) \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{z^{(1)}}{z^{(2)}} + \frac{z^{(2)}}{z^{(1)}} \right) \sin(\mu^{(1)} l_1) \sin(\mu^{(2)} l_2) \quad (6)$$

Вираз (6) дає змогу обчислювати  $\mu$  для різних значень  $\omega$ , будувати дисперсійні криві та визначати частотні інтервали заборонених зон у шаруватій періодичній структурі.

**Властивості матеріалів.** Після вивчення формул та методології вимірювань наступним кроком у дослідженні є порівняння двох обраних моделей. Основними параметрами для порівняння є властивості матеріалів та ширина комірки. Детальна інформація про ці характеристики наведена в таблиці 1.

Головна відмінність між обраними моделями полягає у різних значеннях модуля Юнга гуми, що є важливим параметром для визначення механічних властивостей моделі. Враховуючи інші характеристики, відзначено, що одна з моделей має більшу ширину комірки, що може впливати на

механічні властивості системи в цілому. Порівняння показало, що ширина комірки відіграє важливу роль у формуванні властивостей моделі, а поєднання бетону та

гуми забезпечує оптимальний рівень жорсткості та міцності, необхідний для практичного застосування у реальних умовах [3; 4; 9].

Таблиця 1

Характеристики матеріалів

Параметр	Модель 1	Модель 2
Густина бетону, кг/м <sup>3</sup>	2 300	2 300
Модуль Юнга бетону, Па	$3.14 \times 10^{10}$	$3.14 \times 10^{10}$
Доля об'єму бетону	0.5	0.5
Густина гуми, кг/м <sup>3</sup>	1 300	1 300
Модуль Юнга гуми, Па	$5.8 \times 10^5$	$1.4 \times 10^5$
Доля об'єму гуми	0.5	0.5
Ширина періодичної комірки, м	0.3	0.4

**Числові результати.** Наступний етап передбачає детальне порівняння результатів дослідження, виконаного аналітично та за допомогою програмного забезпечення. Для точнішого визначення оптимальної моделі для практичного застосування необхідно проаналізувати всі параметри та властивості кожної моделі. Результати порівняння допоможуть визначити найефективніший варіант, який може бути використаний у реальних будівельних проєктах.

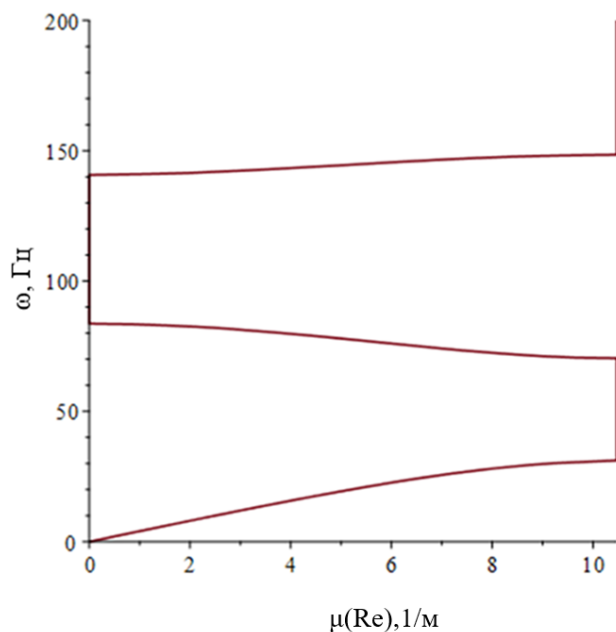


Рис. 2. Дисперсійна діаграма: нормалізована частота  $\omega$  залежно від дійсної частини хвильового числа  $\mu$  (Re), діапазон 0–200 Гц

Для числових розрахунків використовувалася система комп'ютерної алгебри Maple. Як перший приклад

розглянемо високо-контрастний композит, що складається з бетону (31,4 ГПа; 2 300 кг/м<sup>3</sup>) та гуми (0,58 МПа; 1 300 кг/м<sup>3</sup>). Дисперсійні криві та коефіцієнти затухання для частотних діапазонів 0–140 Гц і 0–12 000 Гц наведені на рисунках 2–4 відповідно. Спостерігається, що для Моделі 1, яка має більший модуль пружності та менший розмір комірки, виникають заборонені зони. Перша з них, показана на рисунку 2, розташована в частотному діапазоні від 30 до 70 Гц та від 85 до 140 Гц. Ці графіки дали змогу зрозуміти, як шаруваті структури поведуться за різних умов вібрації.

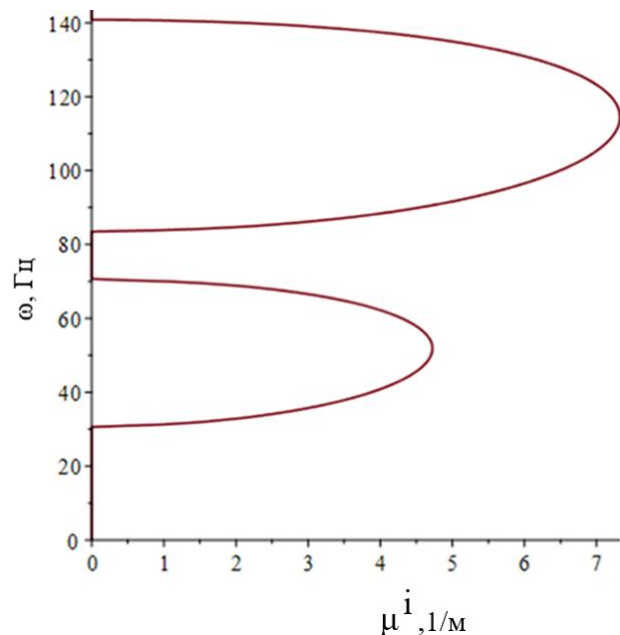


Рис. 3. Діаграма затухання: нормалізована частота  $\omega$  залежно від коефіцієнта затухання (уявної частини хвильового числа  $\mu^i$ ), діапазон 0–140 Гц

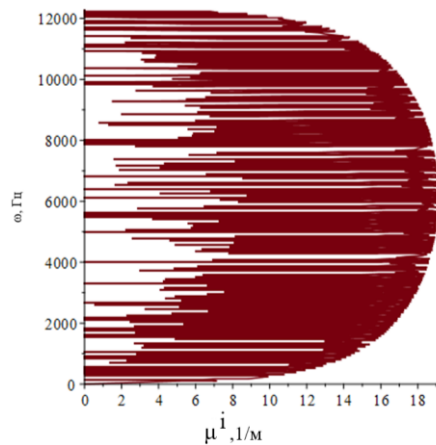


Рис. 4. Діаграма згасання: нормалізована частота  $\omega$  залежно від коефіцієнта згасання (уявної частини хвильового числа  $\mu^i$ ), діапазон 0–12 000 Гц

Дослідження сейсмічних явищ має вирішальне значення для вивчення та прогнозування можливих наслідків, що можуть виникнути у разі їх прояву. У цьому контексті побудова моделей, які дозволяють відтворювати різні сейсмічні умови, є необхідною передумовою для отримання більш повного й точного розуміння поведінки гірських масивів під час землетрусу.

Модель 2, розроблена в межах нашого дослідження, ґрунтується на сейсмічному записі землетрусу, що стався в місті Оровілл, штат Каліфорнія, у 1975 році. Для відтворення зразка було використано дві сейсмограми – OROVILLE/D-DWR180 та OROVILLE/D-DWRDWN. Основна частота запису сейсмограми становила 18,1 Гц [10].

Більш детальне уявлення про поширення хвиль у низькочастотному діапазоні наведено на рисунках 5 і 6. На рисунку 5 подано дисперсійну діаграму, тобто залежність між частотою та дійсною частиною хвильового числа  $\mu$  (Re). Ці ділянки відповідають зонам пропускання, у межах яких хвилі можуть поширюватися через періодичний фундамент. На рисунку 6 показано величину уявної частини хвильового числа  $\mu^i$ , яка характеризує згасання. Там, де  $\mu^i$  стає ненульовим, виникають зони заборони (заборонені зони), і амплітуда хвилі експоненційно зменшується з відстанню.

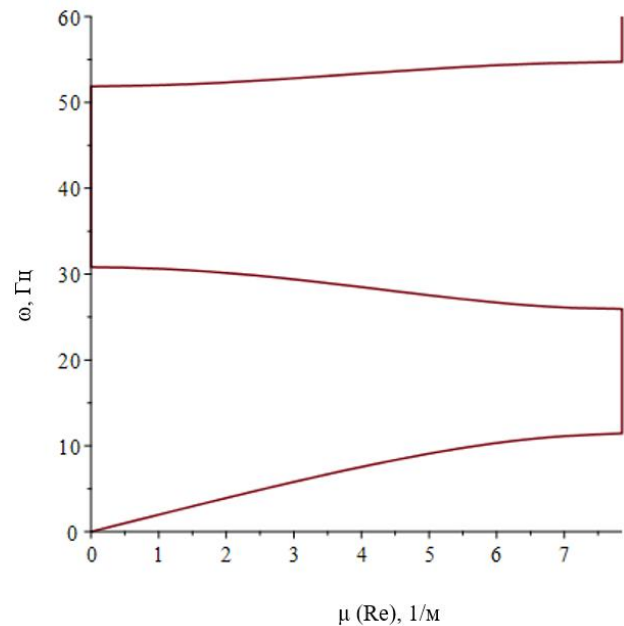


Рис. 5. Дисперсійна діаграма: нормалізована частота  $\omega$  залежно від дійсної частини хвильового числа  $\mu$  (Re), діапазон 0–60 Гц

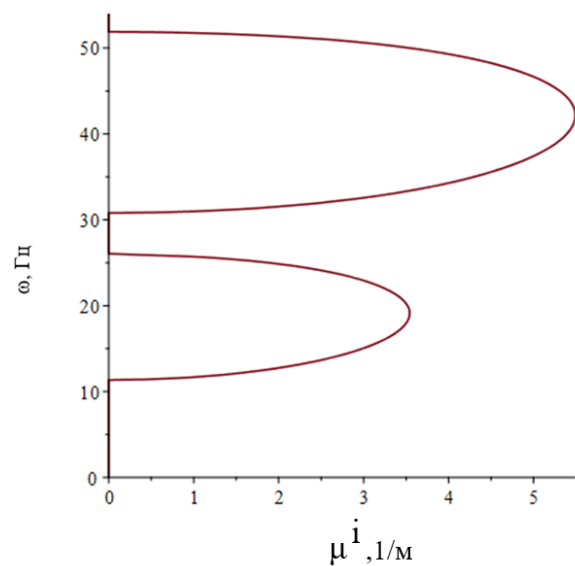


Рис. 6. Діаграма згасання: нормалізована частота  $\omega$  залежно від коефіцієнта згасання (уявної частини хвильового числа  $\mu^i$ ), діапазон 0–55 Гц

Згідно з рисунком 6, виражені заборонені зони для розглянутої структури спостерігаються в частотних діапазонах 11–26 Гц і 31–52 Гц. Ці інтервали становлять особливий практичний інтерес, оскільки саме в них періодичний фундамент забезпечує найефективніше пригнічення вібрацій.

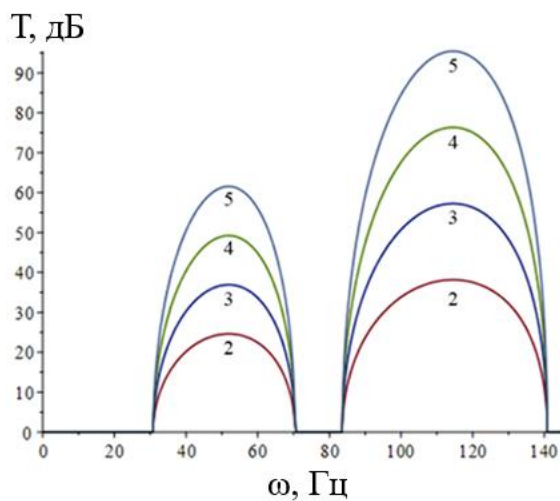
Ці графіки дають змогу зрозуміти, як шаруваті структури поведуться за різних сейсмічних умов. Зокрема, дисперсійна

діаграма дозволяє визначити, які глибинні шари матеріалу мають відмінні властивості, наприклад модуль пружності, що впливає на поширення хвиль.

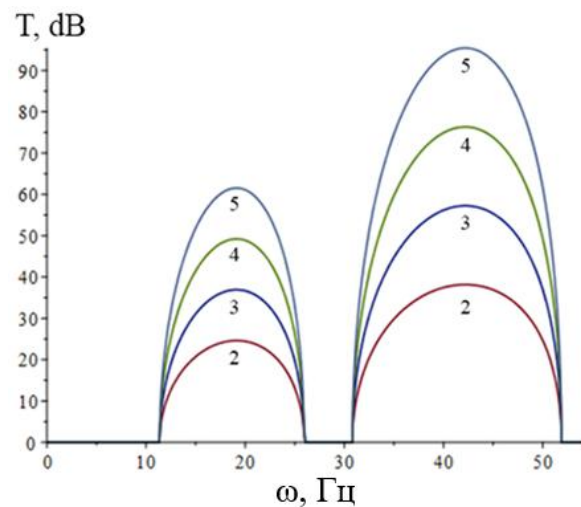
Важливо зазначити, що неоднорідні конструкції є одним із головних чинників, які визначають поведінку будівель під час землетрусу. Знання розподілу властивостей глибинних шарів матеріалу дає змогу розрахувати, як будівлі можуть коливатися та деформуватися під дією землетрусу, що дозволяє розробляти ефективні методи підвищення їхньої сейсмостійкості. Отже,

отримані результати є важливим кроком до забезпечення безпеки будівель під час землетрусів.

На рисунку 7 показано рівні затухання енергії сигналу залежно від частоти для моделей 1 (рис. 7, а) та 2 (рис. 7, б) відповідно. Числа біля кривих позначають кількість комірок періодичності. Можна зробити висновок, що шарувата конструкція лише з п'яти комірок забезпечує ефективний захист від динамічних впливів, зменшуючи енергію хвилі на розрахунковій частоті на 60 дБ (тобто в  $10^6$  разів) [7].



а) Модель 1



б) Модель 2

Рис. 7. Втради на передачу за умов вібраційного впливу

**Моделювання методом скінченних елементів.** У двовимірній постановці розглядалася одна періодична комірка бетонно-гумової основи. Комірка складалася з двох шарів: нижнього гумового та верхнього бетонного, характеристики яких наведено в таблиці 1. Розрахунки виконано в межах двовимірної моделі механіки твердого тіла, тому вважається, що елементарна комірка нескінченно протяжна в напрямку, перпендикулярному до площини моделі.

Особливу увагу приділено граничним умовам – введено дві окремі умови типу «Periodic Condition». На вертикальних бокових межах комірки (ліва і права грані) застосовано стандартну умову періодичності з нульовим фазовим зсувом. У COMSOL це реалізовано як періодичність Флоке з компонентами  $k$ -вектора, рівними нулю в напрямках  $x$  і  $y$ . Такі межі забезпечують

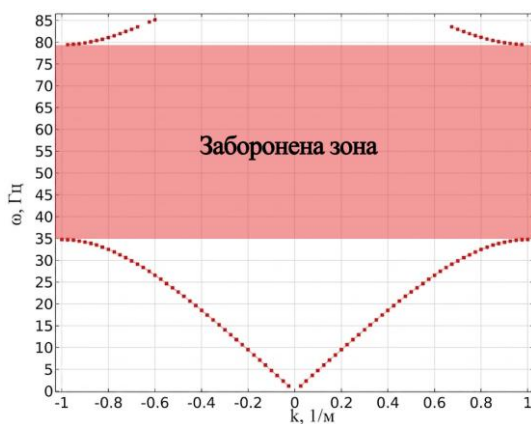
однаковість переміщень і напружень по обидва боки, тому комірка періодично повторюється в горизонтальному напрямку без поширення хвилі вздовж осі  $X$ .

На горизонтальних межах (верхня та нижня грані) накладено періодичність Флоке з ненульовим фазовим зсувом. У цьому випадку  $k$ -вектор має нульову  $x$ -компоненту та змінну  $y$ -компоненту  $k_y$ , яку задано як глобальний параметр. Фізично це означає, що переміщення та напруження на верхній межі дорівнюють відповідним величинам на нижній межі, помноженим на комплексний фазовий множник, який відповідає хвилі, що поширюється вертикально через нескінченний пакет однакових комірок. У дослідженні типу «Eigenfrequency» виконується параметричний прогін за  $k_y$  від нуля до межі першої зони Бріллюена, і для кожного

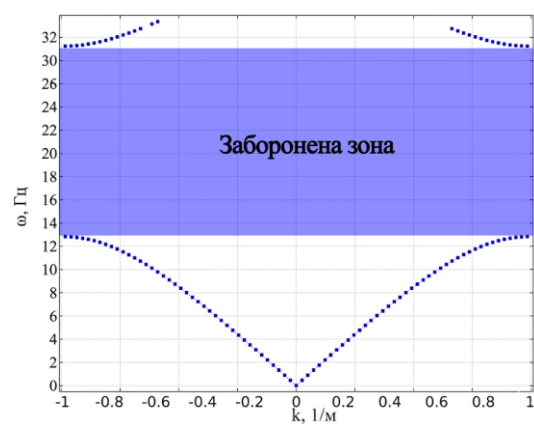
значення  $k$  обчислюються власні частоти комірки. Дисперсійні криві будуються як залежність частоти від безрозмірного параметра  $k$  ( $a/\pi$ ) в інтервалі від  $-1$  до  $1$ , де  $a$  - ширина комірки.

Аналітичний розв'язок у Maple ґрунтується на одновимірній моделі поширення поздовжньої (S) хвилі в шаруватому періодичному середовищі. Використовуючи класичну матричну форму дисперсійного співвідношення для двошарової комірки, хвильове число в періодичному середовищі обчислюється як

функція частоти. Заборонені зони визначаються як частотні інтервали, у яких число Блоха стає комплексним, що відповідає експоненційному затуханню хвилі всередині періодичної основи. Для Моделі 1 аналітична модель прогнозує дві заборонені зони для Р-хвиль приблизно в діапазоні 35–80 Гц (рис. 8, а). Для Моделі 2, через менший модуль пружності гуми та більший період, перші дві заборонені зони зміщуються до нижчих частот – орієнтовно 12–30 Гц (рис. 8, б).



а) Модель 1



б) Модель 2

Рис. 8. Дисперсійні криві двовимірного періодичного фундаменту в COMSOL

Для обох моделей пікові значення заблокованих частот збігаються; зміщення нижньої та верхньої меж становить приблизно 10–15 %, що є прийнятним з огляду на те, що COMSOL розв'язує повну двовимірну задачу теорії пружності, тоді як модель у Maple є строго одновимірною.

### Висновки

На основі наведених у дослідженні результатів встановлено, що шаруваті бетонно-гумові структури ефективно зменшують енергію хвиль і забезпечують захист від динамічних впливів, демонструючи високу здатність оберігати будівлі від вібрацій і сейсмічних навантажень. Показано, що шарувата конструкція лише з п'яти комірок може знизити енергію хвилі на розрахунковій частоті на 60 дБ, що еквівалентно зменшенню у  $10^6$  разів.

Порівняння двох моделей підкреслило важливість таких параметрів, як властивості матеріалів і ширина комірки, у формуванні механічних характеристик конструкцій. Результати дослідження також містять дисперсійні діаграми та коефіцієнти затухання, які демонструють наявність заборонених зон у певних частотних діапазонах, що є ключовим для розуміння поведінки шаруватих структур за різних умов вібрації.

Моделі в COMSOL із періодичними граничними умовами Блоха – Флоке відтворюють структуру заборонених зон, передбачену аналітичним розв'язком у Maple, для обох наборів параметрів. Розташування заборонених зон для поздовжніх хвиль у числовій моделі збігається з аналітичними інтервалами з похибкою в межах кількох відсотків, при цьому загальна картина зон пропускання та

заборонених зон є однаковою. Залишкові відмінності пояснюються спрощеннями одновимірної аналітичної постановки порівняно з повною двовимірною пружною моделлю, у якій повністю враховано зв'язок поздовжніх і поперечних деформацій та реальний напружений стан шарів.

Загалом отримані результати свідчать, що шаруваті бетонно-гумові структури мають потенціал підвищення сейсмостійкості та ефективності віброізоляції будівель,

відкриваючи перспективи для інноваційних підходів у проектуванні конструкцій і підборі матеріалів.

**Подяка.** Ця робота підтримана Європейською Комісією в межах проєкту HORIZON 2020 «Effective Factorisation techniques for matrix-functions: Developing theory, numerical methods and impactful applications», угода про грант ID: 101008140.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mir F. U. H., Yu C.-C., Carmichael B. M., Chisholm B. M., Redd J., Talaat M. M., Bolisetti C. & Whittaker A. S. Guidelines for Implementing Seismic Base Isolation in Advanced Nuclear Reactors – Revision 01. Technical Report MCEER-24-0001 (University at Buffalo, MCEER). Originally published : June 14, 2024. Revision 01. Publication Date: March 7, 2025.
2. Masoom M. N., Karim Q. ul Ain, Badar I., Khushnood R. A., Najam F. A. & Naseer A. Development of a new base isolation system using the concept of metamaterials. *Engineering Structures*. Vol. 286. Article 116151 (1 July 2023). doi: [10.1016/j.engstruct.2023.116151](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116151).
3. Xiang H. J., Shi Z. F., Wang S. J. & Mo Y. L. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations : experimental validation. *Smart Materials and Structures*. 2012. Vol. 21. Pp. 112003-1–112003-10.
4. Shi Z., Cheng Z. & Xiang H. Seismic isolation foundations with effective attenuation zones. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2014. Vol. 57. Pp. 143–151.
5. Aravantinos-Zafiris N. & Sigalas M. M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 118. Pp. 064901-1– 064901-6.
6. Muhammad & Lim C. W. From Photonic Crystals to Seismic Metamaterials : a Review via Phononic Crystals and Acoustic Metamaterials. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. Vol. 29. Pp. 1137–1198. Published: 15 June 2021. doi: [10.1007/s11831-021-09612-8](https://doi.org/10.1007/s11831-021-09612-8).
7. Zhao C., Zeng C., Huang H., Dai J., Bai W., Wang J. & Mo Y. L. Preliminary study on the periodic base isolation effectiveness and experimental validation. *Engineering Structures*. Vol. 226. Article 111364 (1 January 2021). doi: [10.1016/j.engstruct.2020.111364](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111364).
8. Andrianov I. V., Awrejcewicz J., Danishevskyy V. V. Linear and Nonlinear Waves in Microstructured Solids : Homogenization and Asymptotic Approaches. Boca Raton : CRC Press, 2021. 250 p.
9. Wu Q., Xu Z., Xu P., Zeng W., Chen X. Optimal design for rubber concrete layered periodic foundations based on the analytical approximations of band gaps and mapping relations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2024. Vol. 23. Pp. 593–608. Published: 13 July 2024. doi: [10.1007/s11803-024-2259-3](https://doi.org/10.1007/s11803-024-2259-3).
10. PEER Ground Motion Database. URL: <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>.

## REFERENCES

1. Mir F.U.H., Yu C.-C., Carmichael B.M., Chisholm B.M., Redd J., Talaat M.M., Bolisetti C. and Whittaker A.S. Guidelines for Implementing Seismic Base Isolation in Advanced Nuclear Reactors – Revision 01. Technical Report MCEER-24-0001 (University at Buffalo, MCEER). Originally published: June 14, 2024. Revision 01. Publication Date: March 7, 2025.
2. Masoom M.N., Karim Q. ul Ain, Badar I., Khushnood R.A., Najam F.A. and Naseer A. Development of a new base isolation system using the concept of metamaterials. *Engineering Structures*. Vol. 286, article 116151 (1 July 2023). doi: [10.1016/j.engstruct.2023.116151](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116151).
3. Xiang H.J., Shi Z.F., Wang S.J. and Mo Y.L. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations : experimental validation. *Smart Materials and Structures*. 2012, vol. 21, pp. 112003-1–112003-10.
4. Shi Z., Cheng Z. and Xiang H. Seismic isolation foundations with effective attenuation zones. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2014, vol. 57, pp. 143–151.
5. Aravantinos-Zafiris N. and Sigalas M.M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015, vol. 118, pp. 064901-1– 064901-6.
6. Muhammad and Lim C.W. From Photonic Crystals to Seismic Metamaterials : a Review via Phononic Crystals and Acoustic Metamaterials. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022, vol. 29, pp. 1137–1198.

Published: 15 June 2021. [doi: 10.1007/s11831-021-09612-8](https://doi.org/10.1007/s11831-021-09612-8).

7. Zhao C., Zeng C., Huang H., Dai J., Bai W., Wang J. and Mo Y.L. Preliminary study on the periodic base isolation effectiveness and experimental validation. *Engineering Structures*. Vol. 226, article 111364 (1 January 2021). [doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111364](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111364).

8. Andrianov I.V., Awrejcewicz J. and Danishevskyy V.V. *Linear and Nonlinear Waves in Microstructured Solids: Homogenization and Asymptotic Approaches*. Boca Raton : CRC Press, 2021, 250 p.

9. Wu Q., Xu Z., Xu P., Zeng W. and Chen X. Optimal design for rubber concrete layered periodic foundations based on the analytical approximations of band gaps and mapping relations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2024, vol. 23, pp. 593–608. Published: 13 July 2024. [doi: 10.1007/s11803-024-2259-3](https://doi.org/10.1007/s11803-024-2259-3).

10. PEER Ground Motion Database. URL: <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>

Надійшла до редакції: 10.03.2026.

Прийнято після рецензування: 11.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 331.1:331.45:355.58:519.2:614.8:614.89

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.16.1239

## ОБМЕЖЕННЯ ЧИННОГО РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

БЕЛІКОВ А. С.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,

МАЦУК З. М.<sup>2\*</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,

РУДЕНКО В. П.<sup>3</sup>, *асп.*,

АТАНЕСЯН А. А.<sup>4</sup>, *асп.*

<sup>1</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. + 38 (0562) 47-03-25, e-mail: [belikov@pdaba.edu.ua](mailto:belikov@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-5822-9682>

<sup>2\*</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 731-52-26, e-mail: [matsuk.zachar@pdaba.edu.ua](mailto:matsuk.zachar@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-6114-9536>

<sup>3</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 655-57-55, e-mail: [v.p.rudenko@ust.edu.ua](mailto:v.p.rudenko@ust.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0002-0221-2640>

<sup>4</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 359-44-58, e-mail: [atanesian.aram@365.pdaba.edu.ua](mailto:atanesian.aram@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0005-9159-0775>

**Анотація. Постановка проблеми.** Критична інфраструктура (надалі – КІ) є основою стійкого функціонування держави. В умовах зростання техногенної складності, цифровізації та гібридних загроз питання забезпечення безпеки КІ виходить за межі класичних підходів до ризик-менеджменту, оскільки відмова або компрометація окремого елемента системи може ініціювати каскадні ефекти з порушенням міжсекторальних залежностей. Традиційно управління безпекою спирається на ризик-орієнтовану парадигму, в межах якої загрози інтерпретуються через ймовірність реалізації небажаних подій і тяжкість наслідків, а ризик розглядається як вплив невизначеності на цілі. Однак застосування базових підходів виявляє системні обмеження, пов'язані з невизначеністю у прийнятті рішень, нелінійністю природи ризику, адаптивною поведінкою суб'єктів загроз, динамічною зміною конфігурацій фізичних і кіберфізичних систем, що є проблемою. Це формує потребу у переосмисленні меж застосовності відомих моделей ризик-менеджменту та розробленні нових удосконалених рамок, які враховують ризик, стійкість та сценарну невизначеність. **Мета статті** – обґрунтувати межі застосовності відомих ризик-орієнтованих підходів у КІ, запропонувати критерій валідності ризик-оцінювання та концептуальну модель формалізації ефективності заходів безпеки. **Висновок.** Обґрунтовано, що ключове обмеження чинних ризик-орієнтованих підходів полягає у методологічній асиметрії: ймовірність загроз оцінюється, тоді як ймовірність ефективності заходів безпеки не є обов'язковим елементом оцінювання безпеки. Обґрунтовано, що в практичних реалізаціях ризик-орієнтованого підходу ймовірнісна природа заходів безпеки часто не враховується, як у процедурах оцінювання ризику, так і при встановленні рівня безпеки. Запропоновано використання принципу адекватності ймовірностей як метакритерію валідності ризик-оцінювання, як основу формалізації динамічного балансу загроз і контрзаходів, для підвищення керованості безпеки КІ.

**Ключові слова:** *критична інфраструктура; менеджмент ризиків; оцінювання ризику; методологічна асиметрія; принцип адекватності ймовірностей; ймовірність ефективності контрзаходів; прогнозне оцінювання; залишковий ризик; стійкість*

## LIMITATIONS OF THE CURRENT RISK-ORIENTED APPROACH TO ENSURING CRITICAL INFRASTRUCTURE SECURITY

BIELIKOV A.S.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

MATSUK Z.M.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

RUDENKO V.P.<sup>3</sup>, *Postgrad. Stud.*,

ATANESIAN A.A.<sup>4</sup>, *Postgrad. Stud.*

<sup>1</sup> Department of Labour Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-03-25, e-mail: [belicov@pdaba.edu.ua](mailto:belicov@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-5822-9682>

<sup>2\*</sup> Department of Labour Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies,

ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 731-52-26, e-mail: [matsuk.zachar@pdaba.edu.ua](mailto:matsuk.zachar@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-6114-9536>

<sup>3</sup> Department of Labor Protection, Civil and T Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 655-57-55, e-mail: [v.p.rudenko@ust.edu.ua](mailto:v.p.rudenko@ust.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0002-0221-2640>

<sup>4</sup> Department of Labor Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 359-44-58, e-mail: [atanesian.aram@365.pdaba.edu.ua](mailto:atanesian.aram@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0005-9159-0775>

**Abstract. Problem statement.** Critical infrastructure (hereinafter referred to as CI) constitutes the foundation of the state’s resilient functioning. Under conditions of increasing technological complexity, digitalization, and hybrid threats, ensuring CI security extends beyond classical risk management approaches, since the failure or compromise of an individual system element may initiate cascading effects accompanied by disruptions of intersectoral dependencies. Traditionally, security management has relied on a risk-oriented paradigm, within which threats are interpreted in terms of the probability of occurrence of undesirable events and the severity of their consequences, while risk is understood as the effect of uncertainty on objectives. However, the application of these baseline approaches reveals systemic limitations associated with decision-making uncertainty, the nonlinear nature of risk, the adaptive behavior of threat actors, and the dynamic reconfiguration of physical and cyber-physical systems. This, in turn, creates a need to reconsider the applicability boundaries of established risk management models and to develop new, enhanced frameworks that account for risk, resilience, and scenario-based uncertainty simultaneously. **The purpose of the article** is to justify the boundaries of applicability of currently established risk-based (risk-oriented) approaches in critical infrastructure, to propose a validity criterion for risk assessment procedures, and to develop a conceptual model for the formalization of security measure effectiveness. **Conclusions.** The principal limitation inherent in current risk-based approaches has been substantiated: they exhibit methodological asymmetry, whereby threat probabilities are quantified while the probabilities of security measure effectiveness remain non-mandatory elements of safety assessment. It is shown that practical realizations of risk-oriented methodologies commonly neglect the stochastic character of protective measures, both in the risk evaluation process and in the establishment of target safety levels. The principle of probability adequacy is advanced as a meta-criterion of risk assessment validity. This principle provides the conceptual foundation for formalizing the dynamic balance between threats and countermeasures, ultimately improving the controllability (governance) of critical infrastructure safety.

**Keywords:** *critical infrastructure; risk management; risk assessment; methodological asymmetry; probability adequacy principle; probability of control effectiveness; ex ante assessment; residual risk; resilience*

**Постановка проблеми.** Сучасна практика управління ризиками [1-7] враховує ймовірності реалізації загроз, однак не вимагає проведення обов’язкової ймовірнісної оцінки ефективності заходів безпеки. Це формує принциповий розрив між декларованими та фактично досягнутими показниками зниження ризику (як показника підвищення рівня безпеки системи), внаслідок чого втрачається основна управлінська функція ризик-менеджменту: система стає такою, що здатна описувати ризики, але не забезпечує доказовості та адекватності прогнозу зниження ризику.

У межах даного дослідження терміни тлумачаться наступним чином: небезпека (hazard) – джерело/умова з потенціалом завдання шкоди; загроза (threat) – подія/дія або особа (актор), здатні ініціювати реалізацію небезпеки; ризик (risk) – ефект невизначеності на цілі безпеки та стійкості системи, що формується у конкретних сценаріях.

Загальноприйнята логіка у сучасній практиці ризик-менеджменту ґрунтується на наступних базових припущеннях:

- реалізація небезпек через загрози має ймовірнісний характер і підлягає оцінюванню;
- захід безпеки трактується як детермінований фактор зниження ризику, без моделювання ймовірності його успіху/відмови.

Зрозуміло, що в сучасних умовах функціонування критичної інфраструктури ці припущення є методологічно неповними, тому що заходи безпеки, як і загрози, також мають ймовірнісну природу.

У контексті даного дослідження під ймовірністю ефективності заходу безпеки розуміється умовна ймовірність того, що за заданого контексту, режиму функціонування та часових обмежень відповідний захід забезпечує досягнення запланованого ризик-знижувального ефекту щодо визначеного сценарію небезпеки.

Такий ефект може проявлятися у зменшенні ймовірності ініціювання

небезпечної події, обмеженні масштабів її ескалації або зниженні тяжкості наслідків, при цьому сама ефективність заходу розглядається як величина, чутлива до невизначеності, деградації та змін умов експлуатації.

Отже, у парадигмі сучасної безпеки заходи не гарантують зниження ризику, їх ефективність не оцінюється через ймовірність «успіху» та розподіл ефективності і при цьому вони все ж впроваджуються, що становить проблему.

Розглянуті обмеження не залежать від галузі КІ та притаманні широкому класу кіберфізичних і соціотехнічних систем.

**Мета дослідження** – обґрунтувати межі застосовності відомих ризик-орієнтованих підходів у КІ, запропонувати критерій валідності ризик-оцінювання та концептуальну модель формалізації ефективності заходів безпеки.

Методологічною основою дослідження є системний та ризик-орієнтований підходи. Застосовано нормативно-структурний і логіко-структурний аналіз міжнародних та національних вимог з управління ризиками безпеки критичної інфраструктури. Узагальнення результатів здійснено шляхом концептуального моделювання контурів ризик-менеджменту та формулювання критеріальних положень щодо адекватності ризик-орієнтованого підходу в умовах невизначеності та динаміки загроз.

**Результати досліджень.** Сучасна дискусія у сфері ризик-менеджменту розгортається у трьох взаємопов'язаних площинах:

1. методична – нездатність моделей оцінювати реальне зниження ризику («до/після» впровадження заходів);

2. аналітична (оцінювальна) – переважання показників звітності над показниками, що відображають вплив заходів на ризик;

3. управлінська – масове впровадження заходів без попередньої оцінки їх ефективності.

Наприклад, за оглядами консалтингових і аналітичних звітів, практики повномасштабної кількісної оцінки ризиків інформаційної безпеки залишаються

обмеженими, що інтерпретується як недостатня зрілість підходів [8].

З методологічної точки зору такі показники як кількість сповіщень про загрози, обсяги охоплення перевітками, а також показник середнього часу виявлення загроз і реагування на них, поза контекстом реальної ідентифікованої небезпеки, є переважно показниками процесу, а не показниками результативності. Такий підхід декларує керованість діяльності, проте не дає відповіді, чи зменшилися очікувані втрати, частота інцидентів, ймовірність реалізації небезпечного сценарію або масштаб наслідків. У галузевих публікаціях це явище описують як феномен імітації безпеки, коли показники оцінки ризику створюють видимість контролю, але слабо пов'язані з реальним зниженням ризику та фактичним рівнем уразливості систем [9].

Для об'єктів КІ така ситуація є особливо гострою, оскільки зростання «інтенсивності робіт» супроводжується погіршенням прогнозу профілю ризику через зміну (модифікацію) загроз, старіння обладнання, пропорційного зниження ефективності заходів безпеки, накопичення інших прихованих відмов (відхилень) тощо.

Посвідчення невизначеності щодо реального зниження ризику та домінування показників «для звітності» створює сприятливі умови для поширення такого підходу, коли заходи розробляються і впроваджуються насамперед задля виконання формальних вимог законодавства. Як наслідок, організації масштабно закуповують товари, послуги, приймають організаційні рішення тощо без верифікованої оцінки їхньої дієвості з позицій прогнозного зниження ризику.

В оглядових матеріалах галузевих видань підкреслюється потреба визначати пріоритетність заходів на основі прогнозу зниження ризику, а не на основі декларативних заяв аудиторів (експертів) або тиску з боку формальної необхідності [10].

Разом з цим, у трендах провідних аналітичних компаній акцентується, що взаємозалежності, регуляторні зміни та динаміка загроз вимагають переходу від типових заходів безпеки до управління

стійкістю та наслідками, тобто до логіки результативності, а не активності [11].

Відомо, що будь-яка діяльність завжди описується як процес із входами, виходами, ресурсами, власником процесу та показниками результативності.

Відповідно, у безпеці це коли:

- небезпека «вбудована» в процес;
- керуємо параметрами процесу;
- рішення перевірені і відтворювані.

Відомо, що менеджмент ризиків включає наступні процеси [2]:

1. Комунікація та консультації.
2. Встановлення сфери застосування, контексту і критеріїв.
3. Оцінювання ризику, яке включає:
  - ідентифікацію ризику;
  - аналіз ризику;
  - оцінювання ризику;
4. Оброблення ризику.
5. Моніторинг і аналіз процесів
6. Документування і звітність.

Вивчення стандарту [2] дозволяє зробити висновок, що цей стандарт не містить посилань на методіку, яка б прямо встановлювала, як саме кількісно визначити ефективність заходів безпеки до їх впровадження. Стандарт задає принцип: обрати опції оброблення ризику, спланувати їх, а потім оцінити ефективність після реалізації (ex post) і прийняти рішення щодо залишкового ризику. Водночас прогноз ефективності до впровадження заходів (ex ante) у стандарті не формалізовано як обов'язковий елемент.

Таким чином, у чинній рамці ризик-менеджменту відсутній механізм перевірки адекватності очікуваного зниження ризику до реалізації заходів безпеки.

Тобто стандарт [2] є рамковим документом, який не дає інструментарію для доказового прогнозування ефективності заходів безпеки (до/після), відповідно не забезпечує адекватну оцінку рівня безпеки. Стандарт [3] також не встановлює конкретної галузевої процедури оцінювання ефективності заходів безпеки та залишає її вибір за організацією.

Мінімальною вимогою раціональності у межах [2; 3] є недопущення впровадження заходів безпеки, сукупний ризик внаслідок

упровадження яких перевищує ризик, що підлягає зменшенню.

У рамках [2] за використанням технік [3] ефективність заходів безпеки до впровадження визначається як прогнозна зміна параметрів сценаріїв і бар'єрів у моделі ризику.

Водночас, відомо, що у реальних умовах експлуатації об'єктів КІ відсутність репрезентативних даних та унікальність аварійних комбінацій істотно обмежують якість оцінок. За цих умов оцінювання ефективності заходів безпеки зводиться до припущень, доповнених експертними судженнями, які самі є джерелом невизначеності, а отже не забезпечують доказового підтвердження ризику до реалізації заходів.

Стандарт [3] передбачає верифікацію і валідацію результатів оцінювання ризику, перевірку критичних припущень та аналіз чутливості, а також доведення наявності невизначеності до осіб, які ухвалюють рішення. Однак за відсутності емпіричних даних ці процедури забезпечують переважно логічну узгодженість моделей, але не гарантують адекватності ймовірнісних параметрів, що є критичним обмеженням сучасних ризик-орієнтованих підходів у КІ.

Постають питання: якщо небезпека має ймовірнісну природу, а ризик, пов'язаний з її реалізацією, підлягає оцінюванню та обробці, чому в практиці не враховується ймовірнісна природа ефективності заходів безпеки?

Чому ймовірність позитивного (ризик-знижувального) впливу заходів безпеки не підлягає ані оцінюванню, ані подальшій обробці в контурі ризик-менеджменту?

Україна не стала винятком. Відповідно до вимог абзацу другої частини першої статті 22 Закону України «Про критичну інфраструктуру» [12], 1 квітня 2025 року Кабінет Міністрів України затвердив «Вимоги щодо управління ризиками безпеки на об'єктах критичної інфраструктури I категорії критичності» [13] (далі – Вимоги).

Під час проведення досліджень нами визначено обмеження вітчизняного ризик-орієнтованого підходу до забезпечення безпеки КІ, а саме (рис. 1).



Рис. 1. Поточний контур ризик-орієнтованого підходу до безпеки КІ (I категорії)

Виявлені обмеження доцільно розглядати у двох взаємопов'язаних, але принципово різних площинах: нормативно-методологічній та практично-операційній.

Нормативно-методологічні обмеження зумовлені рамковим характером чинних стандартів і регуляторних документів та полягають у відсутності формалізованих вимог щодо обов'язкового прогнозного (ex ante) ймовірного оцінювання ефективності заходів безпеки.

Практично-операційні обмеження пов'язані з особливостями впровадження ризик-орієнтованого підходу в реальних умовах експлуатації об'єктів КІ та проявляються у домінуванні процесних і звітних показників над показниками фактичного зниження ризику, обмеженій доступності репрезентативних даних і високій залежності оцінок від експертних суджень.

Подальший аналіз обмежень вимог [13] здійснюється з урахуванням зазначеного розмежування.

Пункт 8 [13].

Статичний контекст при динамічній природі загроз.

Вихідні дані фактично задають «паспортну» модель об'єкта і загроз, але не описують темп змін, деградацію захистів,

старіння обладнання, а також еволюцію загроз. У промисловості це критично, бо частота відмов, режимні порушення та «дрейф» процедур системно змінюють ризик у часі.

У документі наявна логічна недосконалість організації рівнів аналізу: національний/секторальний/об'єктовий.

Проектні загрози трьох рівнів подані як одне поле даних, але не визначено механізм узгодження масштабів: макрорівневі ризики погано транслуються в параметри НАЗОР/FMEA, а мікрорівневі відмови не агрегуються коректно на рівень сектора. Це формує несумісність моделей і «розриви» при переході між рівнями.

Документ не містить явної вимоги до моделювання залежностей і каскадності процесів.

Є фраза про «зв'язок об'єкта з іншою інфраструктурою», але без інструментів (байєсівські мережі, мережеві моделі, системна динаміка) ця вимога лишається декларативною. Для КІ це породжує недооцінку каскадних відмов і ефектів доміно.

Пункт 9 [13].

Послідовність «ідентифікація → аналіз → оброблення» є коректною логікою, але у тексті постанови відсутня окрема пряма стадія «оцінювання ефективності контрзаходів» та їх оброблення до впровадження, які є обов'язковими.

Пункт 10 [13].

Ключова проблема тут наступна: ідентифікація визначає інциденти та показники, але не задає причинно-наслідкову модель, не вимагає:

- сценарної структури;
- моделі бар'єрів безпеки;
- опису людського чинника як окремого механізму (HEP/HRA), а не як «фактору».

Пункт 11 [13].

Ймовірність визначається, але не перевіряється на адекватність.

Документ дозволяє кількісні, якісні та комбіновані показники, але не встановлює вимоги до:

- калібрування експертних оцінок;
- обліку похибок вимірювань;
- моделювання невизначеності.

В умовах експлуатації КІ ймовірності часто оцінюються з неповних даних або за аналогіями, тому без спеціальних методів, нечіткої логіки або інтервальних моделей, на виході, оператори отримують «точні числа з неточних припущень».

Водночас ранжування ризиків, як визначення і процес, підміняє керування ризиками. Ранжування (визначення вагомості) тут зручне, але:

- воно не гарантує оптимальності розподілу ресурсів;
- ігнорує взаємозалежність ризиків;
- часто стимулює локальну оптимізацію замість підвищення системної стійкості.

Для КІ це породжує типову помилку: оператори обирають заходи проти «найбільшого» ризику, але не проти найбільш системно небезпечного сценарію з каскадною ескалацією.

Також, у документі, деградація бар'єрів не параметризована.

У тексті постанови немає вимоги щодо моделювання:

- зниження надійності бар'єрів у часі;
- прихованих відмов захисту;
- залежних відмов.

Отже, аналіз ймовірності інцидентів стає історично-статистичним, тоді як безпека в промисловості є динамічною характеристикою системи.

Пункт 12 [13].

Відомо, що «вузьке» місце ризик-орієнтованих підходів, це впровадження заходів безпеки без прогнозу їх ефективності з оцінкою постфактум.

В тексті постанови вказано на «визначення найбільш ефективного заходу», але не встановлено процедури оцінювання його ефективності до впровадження.

У результаті рішення може бути прийняте на основі:

- експертної думки;
- звички («так прийнято»);
- перевірочних листів, без кількісного зв'язку з ризиком.

Для промислових КІ це створює ілюзію керованості, коли ризик зменшується «на папері», але не зменшується в реальному процесі.

На додаток, рамкою підходу постанови «супутні ризики» згадано, але також без вимог щодо їх інструментів оцінювання.

Законодавець вказує на супутні ризики від заходів, але не вимагає застосування методів їх аналізу та моделювання.

Тому існує ризик ідентифікувати супутні ризики і не врахувати їх вплив на вибір заходів безпеки для усєї системи.

Пункт 13 [13].

Моніторинг і перегляд актуальності не рідше 1 разу на рік – недостатньо для КІ.

Вимога «не рідше одного разу на рік» на практиці означає – один раз на рік.

Такий цикл перегляду не відповідає реальній змінності умови/модифікації ризиків КІ. Для динамічних загроз потрібне оновлення ризику з частотою, співрозмірною темпу зміни режимів/загроз і мінімум 3 горизонти моніторингу:

- оперативний (дні/тижні),
- тактичний (місяці/квартали),
- стратегічний (рік).

Для багатьох промислових об'єктів КІ параметри процесу можуть змінюватися щогодинно, а деградація бар'єрів має нелінійний характер. Інциденти КІ можуть розгортатися за хвилини. Тому «раз на рік» створює структурне запізнення у контурі ризик-менеджменту КІ.

Далі. Законодавець говорить про «контроль наближення ризику до лімітів», але не вимагає оцінки:

- показників працездатності бар'єрів;
- провідних індикаторів та верифікації фактичного зниження ризику після впровадження заходів.

Таким чином, моніторинг ризику перетворюється на моніторинг документації.

Отже, ризик-орієнтований підхід є методологічно неадекватним, якщо в оцінюванні враховується ймовірність реалізації загроз, але не враховується ймовірність досягнення запланованого ефекту заходів безпеки.

Оновлений контур ризик-менеджменту КІ України, з урахуванням зняття існуючих обмежень, пропонується такий як наведено на рисунку 2.

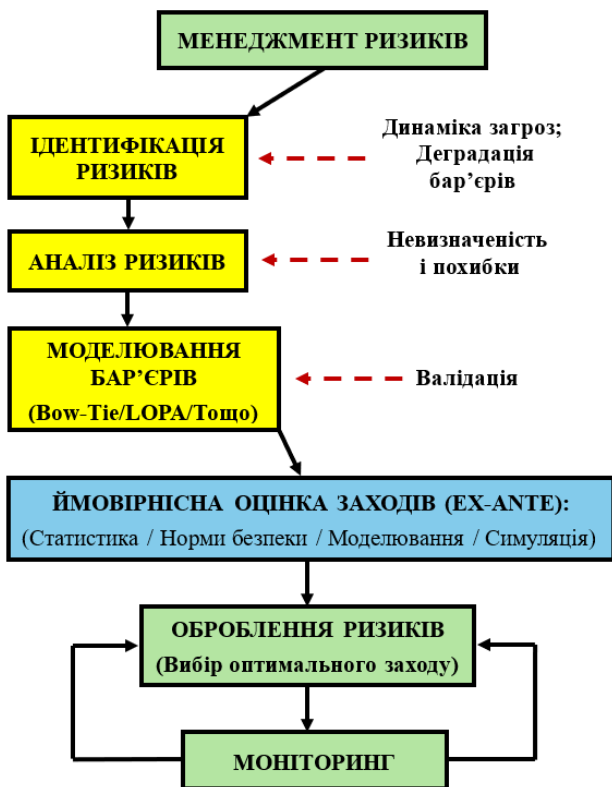


Рис. 2. Цільовий контур ризик-менеджменту КІ

Отже, у базовому підході відбувається асиметрія ймовірностей, яка породжує систематичне зміщення оцінки рівня ризику.

Нормативна рамка, визначена [2; 13], формує контур, що оптимізує відповідність і ранжування, але не забезпечує доказового прогнозу результативності заходів безпеки та адекватності залишкового ризику в умовах деградації й еволюції загроз.

Вочевидь, виникає потреба у розробленні нових, цільових, галузевих, об'єкто-орієнтованих методологій ризик-менеджменту, адаптованих до КІ на базі оновлених стандартів [1–3].

На нашу думку, концептуальні методи ризик-менеджменту повинні враховувати ймовірнісну природу і небезпек, і заходів, проводити їх оцінювання та подальше взаємовідносно оброблення (рис. 3).

На нашу думку, процеси ризик-менеджменту (рис. 3) необхідно доповнити операцією декомпозиції небезпек, з дво- або більше рівневою структурою оцінки (рис. 4). Декомпозиція потрібна і для спрощення системи рівнянь моделювання ризик-подій і для розробки адекватних заходів безпеки.

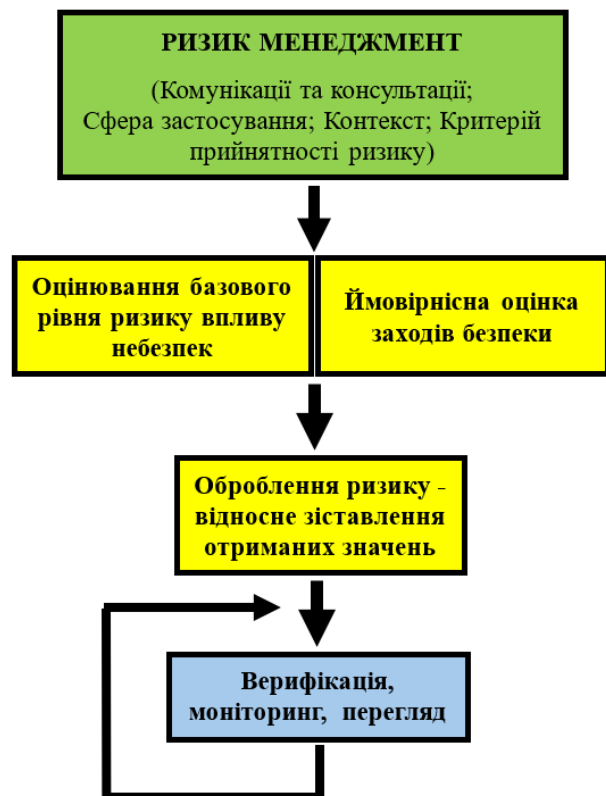


Рис. 3. Концептуальний контур процесів ризик-менеджменту КІ

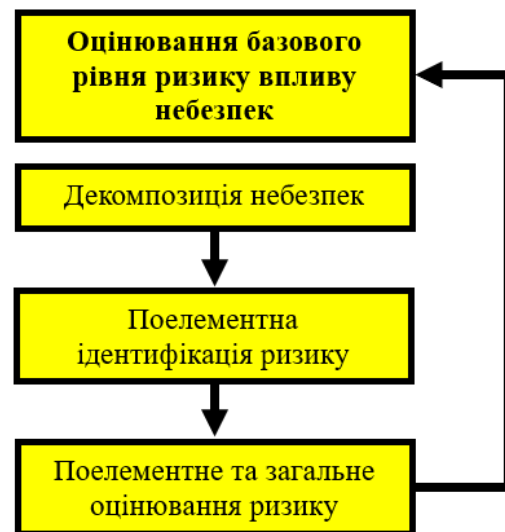


Рис. 4. Оцінювання базового рівня ризику впливу небезпек КІ

Щодо побудови ймовірнісної моделі оцінки заходів безпеки, то це сфера математичного моделювання.

Мета такої моделі – забезпечення формалізованої відповідності між «небезпека → ризик → захід безпеки → залишковий ризик → безпека», до впровадження заходу. Дієвість заходу тут не є детермінованою константою, а має:

- а) ймовірність «успіху»/«відмови»;
- б) умовний розподіл величини ефекту;

с) деградацію в часі та залежність від режимів/контексту.

При цьому, точність прогнозування це функція, а саме:

$$PA = f(PS, DQ, SA), \quad (1)$$

де  $PA$  – точність прогнозування;  $PS$  – структура процесу;  $DQ$  – якість даних;  $SA$  – задоволення припущень.

Тоді, ефективність прогнозування – це ступінь досягнення цілей управління або прийняття рішень завдяки прогнозу. Не плутати із ступінем статистичної близькості прогнозу до факту.

Отже, розробку заходів безпеки доцільно розпочинати після ідентифікації небезпек та визначення цілей систем, які взаємодіють, декомпованих до рівня, що забезпечує можливість математичної формалізації механізмів реалізації їх мети.

Достатнім рівнем декомпозиції слід вважати такий рівень, на якому процеси реалізації небезпек можуть бути математично або фізично змодельовані.

Припущення дослідження наступні:

- небезпека це джерело потенційної шкоди;

- захід безпеки це джерело потенційної користі/засіб зменшення потенційної шкоди та/або тяжкості цієї шкоди;

- алгоритм прогнозування «успіху» в антагоністичній парі симетричний для обох об'єктів прогнозування;

- теорія ймовірностей не розрізняє небезпеку і заходи як такі – вона прогнозує ймовірності реалізації подій (включно з подіями відмови бар'єрів, подіями ескалації, подіями реалізації сценарію тощо).

Гіпотеза дослідження наступна: «У спрощеній антагоністичній постановці небезпеки та заходи можуть бути формалізовані як стохастично еквівалентні фактори протилежного знаку, тоді як їх інтерпретація як «шкоди» або «захисту» визначається виключно цілями та позицією спостерігача».

Гіпотеза ілюструється на спрощеній антагоністичній постановці: «Коли йде двобій об'єктів і обидва об'єкти мають на меті знищення один одного, то напад стає і

небезпекою, і заходом безпеки одночасно в даний момент часу».

У даному дослідженні під симетричністю методів і методологій ймовірнісного аналізу розуміється те, що оцінювання ймовірності реалізації загроз та оцінювання ймовірності досягнення запланованого ефекту заходів безпеки є однотипними задачами стохастичного моделювання, які відрізняються виключно умовами та знаком впливу на цілі системи.

У цій постановці розглядаються не «дії» як такі, а випадкові події їх результатів, що дозволяє відокремити математичну структуру ймовірнісного опису від семантичної інтерпретації впливу як «загрози» або «контрзаходу».

Математичну формалізацію та перевірку (доведення) гіпотези можливо представити у наступному вигляді.

Розглянемо стохастичну систему, що описує взаємодію двох агентів  $A$  та  $B$ .

Антагоністична стохастична постановка вводиться як формальний інструмент для обґрунтування методологічної симетрії ймовірнісного аналізу небезпек і заходів безпеки.

У такій постановці одні й ті самі випадкові події (результати дій, відмови бар'єрів, ескалації) мають інваріантну ймовірнісну структуру, тоді як їх інтерпретація як загроз або заходів безпеки визначається виключно знаком впливу на цільовий функціонал суб'єкта.

Звідси випливає, що техніки [2; 3] є застосовними симетрично як до оцінювання ймовірності реалізації загроз, так і до ймовірнісного оцінювання заходів безпеки за фіксованого контексту, а центральним обмеженням практики є не відсутність математичного апарату, а відсутність нормативної вимоги та процедурної необхідності оцінювати ймовірність ефекту попередні оцінки заходів.

Наприклад, ФТА/ЕТА формалізують структуру причинно-наслідкових комбінацій подій для сценарію ініціювання небезпеки і можуть працювати для сценарію відмови/успіху бар'єра/заходу; байєсівські мережі – залежності між подіями загроз і заходів безпеки; марковські моделі – деградацію станів загроз і заходів у часі.

## 1. Математична модель.

### 1.1. Простір станів.

Стан системи в момент часу  $t \geq 0$  задається вектором:

$$S(t) = (s_A(t), s_B(t)) \in \mathbb{R}_+^2, \quad (2)$$

де  $S(t)$  – вектор стану системи в момент часу  $t$ ;  $s_A(t)$  – величина що характеризує стан агенту  $A$ ;  $s_B(t)$  – величина що характеризує стан агенту  $B$ ;  $\mathbb{R}_+^2$  – простір станів.

Вираз (2) означає, що в кожний момент часу система описується двовимірним вектором невід’ємних випадкових величин, які кількісно характеризують стан кожного з двох антагоністично взаємодіючих агентів.

### 1.2. Простір дій.

Кожен агент  $i \in \{A, B\}$  у кожний момент часу  $t \geq 0$  обирає керування (вплив).

$$a_i(t) \in K \subset \mathbb{R}_+, \quad (3)$$

де  $a_i(t)$  – адаптована керуюча змінна;  $K$  – компактна множина допустимих значень інтенсивності дій;  $K \subset \mathbb{R}_+$  – множина всіх допустимих значень інтенсивності дій.

### 1.3. Стохастична динаміка.

Еволюція системи описується системою диференціальних рівнянь (4, 5):

$$ds_A(t) = -\xi(a_B(t))dt + \sigma dW_A(t), \quad (4)$$

$$ds_B(t) = -\xi(a_A(t))dt + \sigma dW_B(t), \quad (5)$$

де  $s_A(t), s_B(t)$  – це поточний стан агентів  $A$  і  $B$  у момент часу  $t$ ;  $a_A(t), a_B(t)$  – це дії агентів  $A$  і  $B$  у момент часу  $t$ ;  $\xi(\cdot)$  – функція, яка перетворює силу дії на реальну шкоду. Мінус, тому що дія знижує показники стану опонентів  $A, B$ ;  $dt$  – елементарний проміжок часу;  $W_A(t), W_B(t)$  – величина, яка описує випадкові процеси (вінерівські процеси);  $dW_A(t), dW_B(t)$  – величина, яка характеризує випадкові зміни (незначні);  $\sigma$  – коефіцієнт, який показує наскільки сильний випадковий вплив.

Рівняння описують як з часом змінюється рівень «життєздатність» агентів під взаємним впливом дій кожного окремо опонента та впливом випадкових зовнішніх факторів.

Ключова ідея моделі. Кожен агент шкодить лише опоненту, а не самому собі.  $A$  впливає на  $B$ ,  $B$  впливає на  $A$ . Власні дії напряду не «виснажують» власний стан (це свідоме спрощення), що робить модель абсолютно антагоністичною.

Зазначене спрощення введено навмисно з метою елімінування другорядних ефектів та фокусування виключно на інваріантності ймовірнісної структури подій, що є принциповим для обґрунтування методологічної симетрії аналізу небезпек і заходів безпеки.

2. Цільові функціонали та коректна нульова сума.

### 2.1. Базовий функціонал.

Вводиться єдиний функціонал «позитивного результату» для агента  $A$ .

$$J_A(a_A, a_B) = \mathbb{E} \left[ \int_0^T (s_A(t) - s_B(t)) dt \right], \quad (6)$$

де  $J_A$  – критерій позитивного результату для агента  $A$ ;  $a_A, a_B$  – дії (стратегії) агентів  $A, B$ ;  $J_A(a_A, a_B)$  – вираз означає, що результат дій агента  $A$  залежить від дій обох сторін, а не лише від нього самого;  $\int_0^T$  – інтеграл, означає підсумовування по часу (накопичення в часі). Враховується увесь інтервал часу, від 0 до  $T$ , де  $T > 0$  це фіксований горизонт аналізу, до якого оцінюється результат;  $\mathbb{E}[\cdot]$  – математичне сподівання за траєкторіями стохастичного процесу;  $s_A(t), s_B(t)$  – стани агентів  $A, B$ ;  $dt$  – елементарний проміжок часу, це означає, що ми враховуємо не лише величину «позитивного результату), а й те, як довго він зберігається.

У кожен момент часу дивимось хто з опонентів сильніший:  $A$  чи  $B$ ; підсумовуємо цю перевагу за весь час; усереднюємо з урахуванням випадкових факторів; отримуємо результат для агента  $A$ .

Вираз (6) показує, що агент  $A$  максимізує інтегральну різницю між власною «життєздатністю» та «життєздатністю» опонента  $B$ , що відповідає максимізації прагнення «виживання» обох опонентів.

### 2.2. Антагоністичність безпеки.

Функціонал агента  $B$  визначається як показано у (7):

$$J_B(a_A, a_B) = -J_A(a_A, a_B), \quad (7)$$

де  $J_A, J_B$  – критерії позитивного результату для агентів  $A$  та  $B$ ; Вираз (7) означає, що все що вигідно для агента  $A$ , на стільки ж невигідно для агента  $B$ .

Доведення тут, це пряма підстановка:

$$J_B(a_A, a_B) - J_A(a_A, a_B) = 0, \quad (8)$$

Рівності (6, 7) визначають гру з нульовою сумою; отже, у жодних додаткових припущеннях щодо часових моментів реалізації мети опонентів  $A, B$  чи позитивності очікувань немає необхідності. Мінімально необхідну і достатню умову антагоністичності моделі можна вважати описаною.

### 3. Маржинальний ефект дії агентів.

Нехай стратегія агента  $B$  зафіксована. Це означає, що агент  $B$  поводить себе однаково в обох випадках, аналізуємо лише наслідок рішення агента  $A$ . Формально:  $a_B$  в обох формулах однаково (тримаємо це сталим).

Розглянемо дві альтернативні стратегії агента  $A$ : базову  $a_A^0$  та альтернативну  $a_A$ .

Визначимо маржинальний ефект для двох стратегій агента  $A$ ,  $a_A$  та  $a_A^0$ . Маржинальний ефект зміни стратегії агента  $A$  визначається як різниця значень цільових функціоналів при незмінній стратегії агента  $B$ , а саме:

$$\Delta_A [a_A; a_A^0 | a_B]: \quad (9)$$

$$= J_A(a_A, a_B) - J_A(a_A^0, a_B),$$

$$\Delta_B [a_A; a_A^0 | a_B]: \quad (10)$$

$$= J_B(a_A, a_B) - J_B(a_A^0, a_B),$$

де  $a_A$  і  $a_A^0$  – повні стратегії агента  $A$  (керування на всьому часовому інтервалі);  $J_A(\cdot, \cdot), J_B(\cdot, \cdot)$  – цільові функціонали агентів  $A$  та  $B$ ;  $\Delta_A$  – маржинальний позитив для агента  $A$ , тобто зміна його цільового функціонала при переході від  $a_A^0$  до  $a_A$ ;  $\Delta_B$  – маржинальний ефект для агента  $B$  від тієї самої зміни дій (стратегії) агента  $A$ .

Таким чином,  $\Delta_A$  та  $\Delta_B$  кількісно описують вплив однієї й тієї самої дії  $a_A^0$  на цілі різних агентів.

У випадку антагоністичної гри з нульовою сумою, де  $J_B = -J_A$ , безпосередньо впливає:  $\Delta_B = -\Delta_A$ , тобто будь-яке покращення позиції агента  $A$  є симетричним погіршенням позиції агента  $B$ .

Інтерпретація.

Якщо  $\Delta_A > 0$ , перехід від  $a_A^0$  до  $a_A$  є вигідним для агента  $A$  (інтерпретується як захід безпеки з його точки зору).

Одночасно  $\Delta_B < 0$ , тобто та сама дія є шкідливою для агента  $B$  (інтерпретується як загроза з його точки зору).

Це формалізує дуальність інтерпретації дій у симетричних антагоністичних системах. Графічну інтерпретацію маржинального ефекту від дії агента  $A$  (дуальність вигід і втрат) наведено на рисунку 5.

Рисунок наочно демонструє, що одна й та сама зміна стратегії породжує протилежні за знаком маржинальні ефекти для різних агентів, тобто реляційний характер інтерпретації дій як «загрози» або «заходу безпеки». Тобто дія сама по собі не є ні «хорошою», ні «поганою» – її значення залежить від того, з чієї точки зору її оцінюють.

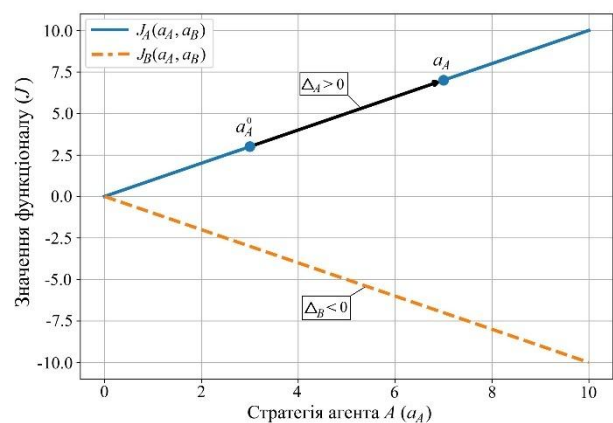


Рис. 5. Маржинальний ефект від дії агента  $A$  (дуальність вигід і втрат) за фіксованої стратегії агента  $B$

### 4. Теорема дослідження.

Нехай система (4, 5) керується відповідно до функціоналів (6, 7). Тоді для будь-яких стратегій  $a_A, a_A^0$  та будь-якої фіксованої стратегії  $a_B$  виконується тотожність:

$$\Delta_B [a_A; a_A^0 | a_B] = -\Delta_A [a_A; a_A^0 | a_B], \quad (11)$$

Доведення.

Із означення нульової суми (7) маємо:

$$\begin{aligned} J_B(a_A, a_B) \\ = -J_A(a_A, a_B) \quad \forall a_A, a_B \in K, \end{aligned} \quad (12)$$

Тоді, застосовуючи це до обох доданків у визначенні (10) маємо:

$$\begin{aligned} \Delta_B &= J_B(a_A, a_B) - J_B(a_A^0, a_B) \\ &= (-J_A(a_A, a_B)) - (-J_A(a_A^0, a_B)) \\ &= -(J_A(a_A, a_B)) - J_A(a_A^0, a_B) \\ &= -\Delta_A \end{aligned} \quad (13)$$

Доведення є елементарним і не вимагає:

- симетрії функції шкоди чи початкових умов;
- існування єдності/рівноваги;
- регулярності функції цінності;
- інших додаткових припущень.

Отримана симетрія маржинальних ефектів означає, що з позицій ймовірнісного аналізу відсутні підстави застосовувати різні класи методів до оцінювання загроз і заходів безпеки; відмінність між ними визначається не математичною природою подій, а знаком впливу на цільовий функціонал системи.

Отримана ілюстративна тотожність  $\Delta_B = -\Delta_A$  у грі з нульовою сумою демонструє, що знак ефекту дії визначається цільовою функцією спостерігача, тоді як модуль ефекту є інваріантним.

5. Твердження, які впливають з доведеної теореми:

Твердження 1. Для будь-якої зміни (дії) від  $a_A^0$  до  $a_A$  виконується:

$$\text{sing}(\Delta_B) = -\text{sing}(\Delta_A), \quad (14)$$

Доведено застосуванням знакової функції до обох частин (11).

Інтерпретація: Одна і та сама дія  $a_A$  є:

- заходом безпеки для  $A$  (якщо  $\Delta_A > 0$ );
- небезпекою для  $B$  ( $\Delta_B = -\Delta_A < 0$ ),

одночасно, в одному і тому ж самому часовому зрізі, що підтверджує гіпотезу.

Твердження 2. Для будь-якої зміни (дії) виконується:

$$|\Delta_A| = |\Delta_B|, \quad (15)$$

Це означає, що дія має єдину кількісну природу впливу, а відмінність полягає виключно в знаку, що визначається цілями спостерігача.

Твердження 3. У грі з нульовою сумою виконується інваріант нульової суми:

$$\begin{aligned} \Delta_A [a_A; a_A^0 | a_B] + \\ + \Delta_B [a_A; a_A^0 | a_B] = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

Доводиться переформулюванням (11).

Інтерпретація: Сума впливів на цілі обох агентів дорівнює нулю. Будь-який позитивний наслідок для одого агента є тотожним негативним наслідком для іншого.

Отже, гіпотеза знайшла математичне підтвердження.

Доведено:

– дуальність інтерпретацій «небезпека-захід безпеки» є математичною необхідністю;

– небезпеки та заходи не є онтологічно різними сутностями, вони є реляційними інтерпретаціями одного й того ж самого стохастичного впливу;

– критерієм класифікації тут є знак впливу на цільовий функціонал спостерігача;

– кількісна величина впливу є інваріантною відносно спостерігача.

Практичне застосування доказу.

Результати доказу мають значення для:

– загальної теорії безпеки та при оновленні стандартів ризик-менеджменту. Формалізація (аналіз) відносності категорій «небезпека»/«загроза» та «захід». Розуміння атак і захисту як дуальних явищ. Аналіз взаємодії «атакувальних» і «захисних» контурів у кіберфізичних системах КІ; для обґрунтування вимог до прогнозного оцінювання результативності бар'єрів (заходів) безпеки та їх деградації;

– аналізу конфліктів. Математичне обґрунтування симетрії сприйняття;

– оптимізації процесів прийняття рішень. Врахування множинних перспектив при оцінці дії.

З огляду на вище викладене, повертаючись до обговорення моделей ймовірнісної оцінки заходів безпеки, можливо стверджувати, що у їх якості слід застосовувати існуючі і нові методи ймовірнісної оцінки небезпек, лише коригуючи мету розрахунку.

З метою якісного оброблення ризику згідно вимог цільової рамки (рис. 3), встановлення рівня безпеки, через відносне зіставлення отриманих значень оцінки ризику і оцінки ефективності заходів безпеки, пропонуємо використовувати принцип адекватності ймовірностей [15].

Застосування цього принципу забезпечує усунення методологічної асиметрії між оцінюванням загроз і оцінюванням заходів безпеки, оскільки вимагає узгодженого ймовірнісного опису обох типів подій у межах єдиного контуру ризик-менеджменту.

Практичне значення дослідження.

Отримані у ході дослідження результати можуть бути використані для вдосконалення практики ризик-орієнтованого управління безпекою критичної інфраструктури шляхом включення прогнозного ймовірнісного оцінювання ефективності заходів безпеки.

Запропонований принцип адекватності ймовірностей може застосовуватися як метакритерій перевірки валідності рішень щодо вибору та пріоритетизації контрзаходів, а також при розробленні галузевих і об'єкто-орієнтованих методик оцінювання безпеки КІ.

Обмеження дослідження. Дослідження має концептуально-методологічний характер і не включає емпіричної валідації запропонованих положень на основі статистичних даних експлуатації конкретних об'єктів КІ. Формалізація ймовірнісної моделі результативності заходів безпеки здійснювалася у спрощеній постановці та потребує подальшого уточнення для складних багатокомпонентних і міжсекторальних систем.

Перспективи подальшого дослідження полягають:

– у розробленні прикладних ймовірнісних моделей оцінювання ефективності заходів безпеки;

– у розробленні об'єкто-орієнтованих методик ймовірнісного аналізу і прогнозного оцінювання ефективності заходів безпеки.

## Висновки

1. У роботі на основі нормативно-структурного та логіко-структурного аналізу міжнародних стандартів і національних регуляторних вимог показано, що чинний ризик-орієнтований підхід до виробничої безпеки і безпеки критичної інфраструктури має системні методологічні обмеження.

2. Встановлено, що ключовим обмеженням чинного підходу є асиметрія ймовірностей: ймовірність реалізації загроз оцінюється, тоді як ймовірність досягнення запланованого ефекту заходів безпеки не є обов'язковим елементом ризик-оцінювання.

3. Показано, що зазначена асиметрія призводить до систематичного заниження оцінки залишкового ризику та формування ілюзії керованості безпеки, особливо в умовах деградації бар'єрів (заходів), призводить до каскадності і динаміки загроз.

4. Запропоновано принцип адекватності ймовірностей як метакритерій валідності ризик-орієнтованого підходу, відповідно до якого оцінювання ризику є методологічно коректним лише за умови узгодженого врахування ймовірностей сценаріїв загроз та результативності заходів безпеки.

5. За допомогою антагоністичної стохастичної постановки (моделі) обґрунтовано, що ймовірнісна природа загроз і заходів безпеки є ізоморфною, а відмінність між ними визначається виключно знаком впливу на цільовий функціонал системи та позицією спостерігача.

6. Синтезовано цільовий контур ризик-менеджменту КІ, який включає прогнозне оцінювання ефективності заходів, врахування їх деградації та багаторівневий моніторинг, що підвищує керованість питань виробничої безпеки та безпеки критичної інфраструктури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO 31073:2022. Risk management. Vocabulary. Geneva : International Organization for Standardization, 2022. 15 p.
2. ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 23 с.
3. ДСТУ EN IEC 31010:2022. Керування ризиками. Методи оцінки ризиків (EN IEC 31010:2019, IDT ; IEC 31010:2019, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 94 с.
4. ДСТУ EN ISO 22301:2021. Безпека та стабільність. Системи управління неперервністю бізнесу. Вимоги (EN ISO 22301:2019, IDT; ISO 22301:2019, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 26 с.
5. ДСТУ EN ISO 14090:2022. Адаптація до змін клімату. Принципи, вимоги та настанови (EN ISO 14090:2019, IDT; ISO 14090:2019, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 48 с.
6. ДСТУ ISO 55001:2019. Управління активами. Системи управління. Вимоги (ISO 55001:2014, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 58 с.
7. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 17 с.
8. PwC. Global Digital Trust Insights 2026. 2025. URL: <https://www.pwc.es/es/publicaciones/digital/global-digital-trust-insights-2026.pdf> (дата звернення: 17.01.2026).
9. The Hacker News. Security Theater: Vanity Metrics Keep You Busy – and Exposed [Електронний ресурс]. 2025. URL: <https://thehackernews.com/2025/04/security-theater-vanity-metrics-keep.html> (дата звернення: 17.01.2026).
10. SAFE Security. Measuring Cybersecurity ROI: A Framework for 2026 Decision-Makers [Електронний ресурс]. 2025. URL: <https://safe.security/resources/blog/measuring-cybersecurity-roi-a-framework-for-2026-decision-makers/> (дата звернення: 17.01.2026).
11. Gartner. Gartner Identifies the Top Cybersecurity Trends for 2025 [Електронний ресурс]. 2025. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2025-03-03-gartner-identifiesthe-top-cybersecurity-trends-for-2025> (дата звернення: 17.01.2026).
12. Закон України «Про критичну інфраструктуру» від 16.11.2021 № 1882-IX (зі змінами, внесеними Законом України від 22.08.2024 № 3931-IX). *Відомості Верховної Ради України*. 2023. № 5. Ст. 13 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20> (дата звернення: 19.01.2026).
13. Про затвердження вимог щодо управління ризиками безпеки на об'єктах критичної інфраструктури І категорії критичності : постанова Кабінету Міністрів України від 01.04.2025 № 367 : станом на 19.01.2026 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/367-2025-%D0%BF#Text> (дата звернення: 19.01.2026).
14. ДСТУ EN IEC 31010:2013. Керування ризиками. Методи оцінки ризиків (EN IEC 31010:2013, IDT ; IEC 31010:2013, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 94 с.
15. Matsuk Z., Belikov A., Slashchova O., Digtyar K., Ikonnikov M. Safety theory. The principle of probability adequacy in the methodology of risk management of infrastructure systems stability : plenary presentation. *Proceedings of the VII International Conference “Essays on Mining Science and Practice”*. November 5–7, 2024. Dnipro, Ukraine [Електронний ресурс]. URL: <https://www.rmget.com/index.php/keynote-lectures.html> (дата звернення: 25.01.2026).

## REFERENCES

1. ISO 31073:2022. Risk management. Vocabulary. Geneva : International Organization for Standardization, 2022. 15 p.
2. *DSTU ISO 31000:2018. Menedzhment ryzykiv. Pryntsypy ta nastanovy (ISO 31000:2018, IDT)* [DSTU ISO 31000:2018. Risk management. Principles and guidelines (ISO 31000:2018, IDT)]. Kyiv : SE “UkrNDNTS”, 2018, 23 p. (in Ukrainian).
3. *DSTU EN IEC 31010:2022. Keruvannya ryzykamy. Metody otsinky ryzykiv (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT)* [DSTU EN IEC 31010:2022. Risk management. Risk assessment methods (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT)]. Kyiv : SE “UkrNDNTS”, 2022, 94 p. (in Ukrainian).
4. *DSTU EN ISO 22301:2021. Bezpeka ta stabil'nist'. Systemy upravlinnya neperernivnyu biznesu. Vymohy (EN ISO 22301:2019, IDT; ISO 22301:2019, IDT)* [DSTU EN ISO 22301:2021. Security and stability. Business continuity management systems. Requirements (EN ISO 22301:2019, IDT; ISO 22301:2019, IDT)]. Kyiv : SE “UkrNDNTS”, 2021, 26 p. (in Ukrainian).
5. *DSTU EN ISO 14090:2022. Adaptatsiya do zmin klimatu. Pryntsypy, vymohy ta nastanovy (EN ISO 14090:2019, IDT; ISO 14090:2019, IDT)* [DSTU EN ISO 14090:2022. Adaptation to climate change. Principles, requirements and guidelines (EN ISO 14090:2019, IDT; ISO 14090:2019, IDT)]. Kyiv : SE “UkrNDNTS”, 2022, 48 p. (in Ukrainian).
6. *DSTU ISO 55001:2019. Upravlinnya aktyvamy. Systemy upravlinnya. Vymohy (ISO 55001:2014, IDT)* [DSTU ISO 55001:2019. Asset management. Management systems. Requirements (ISO 55001:2014, IDT)]. Kyiv : SE “UkrNDNTS”, 2019, 58 p. (in Ukrainian).

7. DSTU 2293:2014. *Okhorona pratsi. Terminy ta vyznachennya osnovnykh ponyat'* [DSTU 2293:2014. Occupational health and safety. Terms and definitions of basic concepts]. Kyiv : SE "UkrNDNTS", 2015, 17 p. (in Ukrainian).

8. PwC. (2025). Global digital trust insights 2026. URL: <https://www.pwc.es/es/publicaciones/digital/global-digital-trust-insights-2026.pdf>

9. The Hacker News. (2025). Security theater : Vanity metrics keep you busy – and exposed. URL: <https://thehackernews.com/2025/04/security-theater-vanity-metrics-keep.html>

10. SAFE Security. (2025). Measuring cybersecurity ROI : A framework for 2026 decision-makers. URL: <https://safe.security/resources/blog/measuring-cybersecurity-roi-a-framework-for-2026-decision-makers/>

11. Gartner. (2025, March 3). Gartner identifies the top cybersecurity trends for 2025. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2025-03-03-gartner-identifiesthe-top-cybersecurity-trends-for-2025>

12. *Zakon Ukrainy "Pro krytychnu infrastrukturu" vid 16.11.2021 № 1882-IX (zi zminamy, vnesenymy Zakonom Ukrainy vid 22.08.2024 № 3931-IX)* [Law of Ukraine "On Critical Infrastructure" dated 16.11.2021 No. 1882-IX (as amended by the Law of Ukraine dated 22.08.2024 No. 3931-IX)]. *Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine]. 2023, no. 5. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20> (date of access : 19.01.2026). (in Ukrainian).

13 *Pro zatverdzhennya vymoh shchodo upravlinnya ryzykamy bezpeky na ob"yektakh krytychnoyi infrastruktury I katehoriyi krytychnosti : postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 01.04.2025 № 367 : stanom na 19.01.2026* [On approval of requirements for security risk management at critical infrastructure facilities of category I criticality: resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 01.04.2025 No. 367: as of 19.01.2026]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/367-2025-%D0%BF#Text> (in Ukrainian).

14. *DSTU EN IEC 31010:2013. Keruvannya ryzykamy. Metody otsinky ryzykiv (EN IEC 31010:2013, IDT ; IEC 31010:2013, IDT)* [DSTU EN IEC 31010:2013. Risk management. Risk assessment methods (EN IEC 31010:2013, IDT; IEC 31010:2013, IDT)]. Kyiv : State Enterprise "UkrNDNTS", 2015, 94 p. (in Ukrainian).

15. Matsuk Z., Belikov A., Slashchova O., Digtyar K. and Ikonnikov M. Safety theory. The principle of probability adequacy in the methodology of risk management of infrastructure systems stability [Plenary presentation]. In Proceedings of the VII International Conference "Essays on Mining Science and Practice". November 5–7, 2024, Dnipro, Ukraine. URL: <https://www.rmget.com/index.php/keynote-lectures.html>

Надійшла до редакції: 01.03.2026.

Прийнято після рецензування: 01.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 624.014.2

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.30.1240

## КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ СТРУКТУРНИХ РІШЕНЬ СТАЛЕВИХ ПРОМИСЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

БІЛОКОНЬ А. І.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
КИСЛИЦЯ Л. В.<sup>2\*</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
ІВАНЧАК С. В.<sup>3</sup>, *ст. виклад.*

<sup>1</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 566-53-14, e-mail: [belokon0604@gmail.com](mailto:belokon0604@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-5229-781X>

<sup>2\*</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 78-031-78, e-mail: [lina\\_kalnysh@ukr.net](mailto:lina_kalnysh@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-4563-2530>

<sup>3</sup> Факультет військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (068) 844-75-57, e-mail: [svivanchak79@gmail.com](mailto:svivanchak79@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0003-2364-540X>

**Анотація.** *Стаття присвячена* концептуальному плануванню структурних рішень сталевих промислових будівель в умовах відновлення виробничого потенціалу України після масштабних руйнувань, спричинених військовою агресією. Обґрунтовано актуальність застосування швидкокомтованих сталевих конструкцій як ефективного підходу до поновлення промислових будівель із дотриманням вимог енергоефективності, економічності та сталого розвитку. **Об'єктом дослідження** є сталеві промислові будівлі швидкокомтованого типу, предметом – концептуальні підходи до формування їх структурно-конструктивних рішень. **Метою роботи** є розроблення практичного інструментарію для концептуального планування сталевих промислових будівель з урахуванням інтересів усіх учасників будівельного процесу. На основі аналізу сучасних наукових джерел узагальнено кращі світові та європейські практики сталевих будівництва, визначено ключові аспекти концептуального проектування, які згруповано за просторовими, конструктивними та технологічними ознаками. Запропоновано ієрархічну модель прийняття рішень, що дозволяє систематизувати вимоги замовника та забезпечити збалансований вибір структурно-компонувочних рішень. Для обґрунтування вибору альтернатив проектних рішень застосовано метод аналізу ієрархій, який дає змогу кількісно оцінити вплив критеріїв та підкритеріїв на досягнення загальної мети проекту. Наведено практичний приклад порівняльної оцінки альтернативних варіантів структурних рішень промислової сталеві будівлі. **Результати дослідження:** отримані результати можуть бути використані власниками, девелоперами, проєктувальниками та будівельними організаціями для обґрунтованого вибору концептуальних структурних рішень сталевих промислових будівель з урахуванням економічних, експлуатаційних та технологічних пріоритетів.

**Ключові слова:** *сталеві промислові будівлі; концептуальне проектування; швидкокомтовані сталеві конструкції; метод аналізу ієрархій; структурно-конструктивні рішення*

## CONCEPTUAL PLANNING OF STRUCTURAL SOLUTIONS FOR STEEL INDUSTRIAL BUILDINGS

BILOKON A.I.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
KYSLYTSIA L.V.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
IVANCHAK S.V.<sup>3</sup>, *Ass. of Prof.*

<sup>1</sup> Department of Construction Production Technology, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 566-53-14, e-mail: [belokon0604@gmail.com](mailto:belokon0604@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-5229-781X>

<sup>2\*</sup> Department of Construction Production Technology, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 78-031-78, e-mail: [lina\\_kalnysh@ukr.net](mailto:lina_kalnysh@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-4563-2530>

<sup>3</sup> Faculty of Military Training of Specialists of the State Special Transport Service, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryan Str., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (068) 844-75-57, e-mail: [svivanchak79@gmail.com](mailto:svivanchak79@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0003-2364-540X>

**Abstract.** *The paper is devoted* to the conceptual planning of structural solutions for steel industrial buildings in the context of restoring Ukraine's industrial capacity after large-scale destruction caused by military aggression. The relevance of using pre-engineered steel structures is substantiated as an effective tool for the rapid reconstruction of industrial facilities while meeting the requirements of energy efficiency, cost-effectiveness, and sustainable development. *The object of the study* is pre-engineered steel industrial buildings, while the subject is conceptual approaches to the formation of their structural and construction solutions. *The aim of the research* is to develop a practical approach and toolkit for the conceptual planning of steel industrial buildings, taking into account the interests of all stakeholders involved in the construction process. Based on an analysis of contemporary scientific sources, best international and European practices in steel construction are summarized, and key aspects of conceptual design are identified and grouped into spatial, structural, and technological categories. A hierarchical decision-making model is proposed, which enables the systematization of client requirements and ensures a balanced selection of structural layout solutions. To substantiate the choice among alternative design solutions, the Analytic Hierarchy Process (AHP) is applied, allowing for a quantitative assessment of the influence of criteria and sub-criteria on achieving the overall project objective. A practical case study is presented, demonstrating a comparative evaluation of alternative structural solutions for a steel industrial building. **Research results:** The obtained results can be used by owners, developers, designers, and construction organizations to justify the selection of conceptual structural solutions for steel industrial buildings, taking into account economic, operational, and technological priorities.

**Keywords:** *steel industrial buildings; conceptual design; pre-engineered steel structures; Analytic Hierarchy Process; structural solutions*

**Вступ.** Україна втратила сотні підприємств промисловості від руйнувань внаслідок військової агресії росії. Станом на листопад 2024 року прямі збитки складають \$14,4 млрд (частка 8,5 %) [1].

**Огляд літератури з теми дослідження.** Поновлення втрачених виробничих площ будівель промислового призначення, принаймні частково, у найкоротші терміни можливе завдяки технології швидкокомпонованого сталевих будівництва.

Швидкокомпоновані сталеві конструкції дають змогу створювати ефективні, економічні та екологічно стійкі будівлі, що відповідають сучасним стандартам енергоефективності.

Докладний аналіз публікацій в галузі сталевих будівництва [2] дозволив узагальнити комплекс знань, які стосуються:

- кращих практик в галузі сталевих будівництва;
- інтеграції і оптимізації процесів зведення швидкокомпонованих сталевих промислових будівель;
- структури витрат на зведення сталевих будівель і альтернативних проєктів каркасного будівництва;
- ефективності і безпеки монтажу сталевих швидкокомпонованих каркасів будівель;
- інтегрованого проєктування сталевих каркасів на основі BIM-технологій;

– цифровізації і побудові віртуальної моделі (фізичної і поведінкової);

– механічних і геометричних властивостей сталевих конструкцій (з'єднань, балок, рам);

– відмінностей будівництва збірних систем швидкокомпонованих металевих будівель, у порівнянні з традиційним сталевим будівництвом та ін.

Результати вивчення наукових праць дозволили сформулювати основні переваги сталевих будівництва [2], які сприяють: підвищенню енергоефективності, стійкості, поліпшенню співпраці учасників будівельного процесу, забезпеченню ефективності використання сталі в будівництві; оптимізації процесу проєктування; зниженню витрат і підвищенню продуктивності будівництва; екологічності та економічності будівництва; забезпеченню якості, довговічності та безпечного результату; високому рівню стандартизації; високому рівню безпеки та надійності конструкцій; мінімізації ризиків планування, зведення та експлуатації; високому рівню координації співпраці, забезпеченню комплексного проєктування на всіх етапах будівництва.

Найкращі форми сталевих промислових будівель та їх застосування в Європі, регіональні відмінності, які можуть існувати в залежності від практики, нормативних

актів та можливостей ланцюга постачань описані в роботі [3].

В роботі надано цінну інформацію фахівцям, які працюють над проектами промислового сталевих будівництва. Зроблений аналіз майбутніх тенденцій і

перспектив наступного покоління сталевих будівель.

Міркування щодо майбутнього концептуального проектування представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Міркування щодо концептуального планування

Тип одноповерхових промислових будівель	Оптимізація простору	Швидкість будівництва	Доступ і безпека	Гнучкість використання та простору	Екологічні показники	Стандартизація компонентів	Спеціалізована інфраструктура	Сталість	Закінчення терміну експлуатації та повторне використання	Інтеграція послуг	Ландшафтний дизайн	Естетика та візуальний вплив	Теплові характеристики та повітропроникність	Акустична ізоляція	Атмосферостійкість	Розрахунковий термін служби
Багатоярусні склади	!	!	!	!	✓	!	✓	✓	!	✓	✓	✓	✓		!	✓
Промислові виробничі потужності	!	✓	✓	!		✓	✓		✓	✓		✓	✓	!	✓	✓
Розподільчі центри	!	!	!	!	✓	!	!	✓	!	!	!	✓	✓		!	✓
Роздрібні супермаркети	!	✓	!	!	!	!		!	!	✓	!	!	!		!	✓
Склади / холодильні камери	✓	✓	!	✓	!	✓		✓	!	✓		✓	!		✓	✓
Малі виробничі потужності	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	
Офісне та легке виробництво	✓	✓	✓	✓	!	✓		!	!	✓	✓	✓	!	!	✓	✓
Переробні підприємства	✓	✓	!		✓	✓	✓	!	!	✓		✓	!	!	✓	✓
Розважальні центри	!	✓	✓	!	!	✓		!	✓	✓	!	!	!	✓	!	!
Комплекси спортивних залів	!	✓	✓	!	!	✓		!	✓	✓	!	!	!		!	!
Виставкові зали	!	✓	✓	!	!	✓		!	✓	✓	!	!	!	!	!	!
Ангари для літаків або технічного обслуговування	✓	✓	!	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Умовні позначення:	Без галочки = не важливо						✓ = важливо						!= дуже важливо			

Практичний посібник з планування безпечного зведення сталевих конструкцій [4] допомагає мінімізувати ризики, забезпечує координацію між учасниками процесу і підвищує якість робіт.

Посібник містить докладний опис основних етапів будівництва, включно з розробленням послідовності монтажу, взаємодію із всіма учасниками процесу на всіх етапах життєвого циклу проектування (зведення, утримання, експлуатації).

Вказано, ефективне будівництво одноповерхових металевих будівель вимагає

інтеграції всіх процесів – від проектування до фінального введення в експлуатацію. Важливо, щоб учасники розуміли свої взаємозалежності та працювали злагоджено.

На оптимізації процесів проектування, впровадженні інноваційних рішень, підвищенні енергоефективності, стійкості будівель, а також поліпшенні злагодженої співпраці між усіма учасниками будівельного процесу акцентує увагу і робота [5].

Теоретичні основи визначення і взаємодії зацікавлених груп осіб в проєктах описані в роботах і інших авторів [6; 7].

В рамках дослідження [2] проведено експертне оцінювання характерних ознак промислових будівель виготовлених із сталевих конструкцій (склади, промислові виробничі, розважальні центри, спорткомплекси, виставкові комплекси) і визначено вагомість ознак на які слід зважати на стадії розробки концептуальної моделі сталевих будівель. Якщо в роботі [3] автори визначили і оцінили вагомість ознак концептуального проєктування сталевих будівель (нового покоління) на основі нечіткої шкали оцінок («важливо», «дуже важливо», «неважливо»), то в рамках дослідження [2] характерні важливі ознаки концептуального проєктування сталевих будівель оцінено кількісно.

У підсумку було отримано кількісні оцінки і рейтинг важливості визначальних критичних характеристик, на які переважно слід зважати при концептуальному проєктуванні сталевих будівель промислового призначення.

В першу чергу із зазначених, із врахуванням ринкових потреб і особливостей регіонального рівня, слід зважати на такі ознаки: доступ і безпека; екологічні фактори; теплові характеристики та повітронепроникність; атмосферостійкість і розрахунковий термін служби будівлі.

Керівництво з проєктування та будівництва стійких складських будівель [8] розроблене щоб допомогти девелоперам і власникам складів у впровадженні ефективних та екологічно відповідальних будівельних рішень.

Оптимізація проєктних рішень будівель із застосуванням сталі забезпечує баланс між екологічною ефективністю та економічною доцільністю, сприяє зменшенню витрат ресурсів та використанню відновлювальних джерел енергії у т. ч. освітлення, вентиляції та утеплення.

Значну роль у забезпеченні успішного будівництва буде відігравати наявність досвідчених і компетентних клієнтів

(власників, майбутніх користувачів), які можуть чітко визначити свої вимоги та забезпечити створення продуктивного середовища співпраці між усіма сторонами процесу. Все, що для цього потрібно, це чіткий і зрозумілий для всіх підхід до концептуального проєктування.

**Мета дослідження.** Автори ставлять на меті надати практичний підхід і інструментарій для власників, проєктувальників і виробничників щодо концептуального планування структурних рішень сталевих будівель, які відповідають кращій практиці і задовольняють вимогам усіх учасників будівельного процесу.

**Об'єктом дослідження** є сталеві промислові будівлі швидкокомпонованого типу.

**Предмет:** концептуальні підходи до формування структурно-конструктивних рішень сталевих будівель.

Для досягнення мети необхідне вирішення наступних завдань:

1. Дати характеристику сталевим будівлям і актуальності сталевого будівництва в умовах, які склалися в Україні.
2. Розглянути сталеве будівництво з огляду міркувань учасників будівельного процесу на стадії концептуального планування проєктів.
3. Показати характерні напрямки концептуального проєктування сталевих будівель (чому відповідати, що враховувати, на що зважати).
4. Представити задачу у вигляді ієрархії (ієрархічної структури).
5. Надати практичний приклад рішення задачі методом аналізу ієрархій.

**Викладення результатів дослідження.** Попередній аналіз досліджень і публікацій з даної теми дозволив визначити основні міркування щодо концептуального проєктування одноповерхових промислових сталевих будівель (табл. 1).

Короткий огляд тенденцій планування майбутніх рішень проєктів дозволяє виділити три напрями розвитку (рис. 1), а саме:

- аспекти простору (АП);
- аспекти конструкції (АК);

– аспекти технології (АТ).

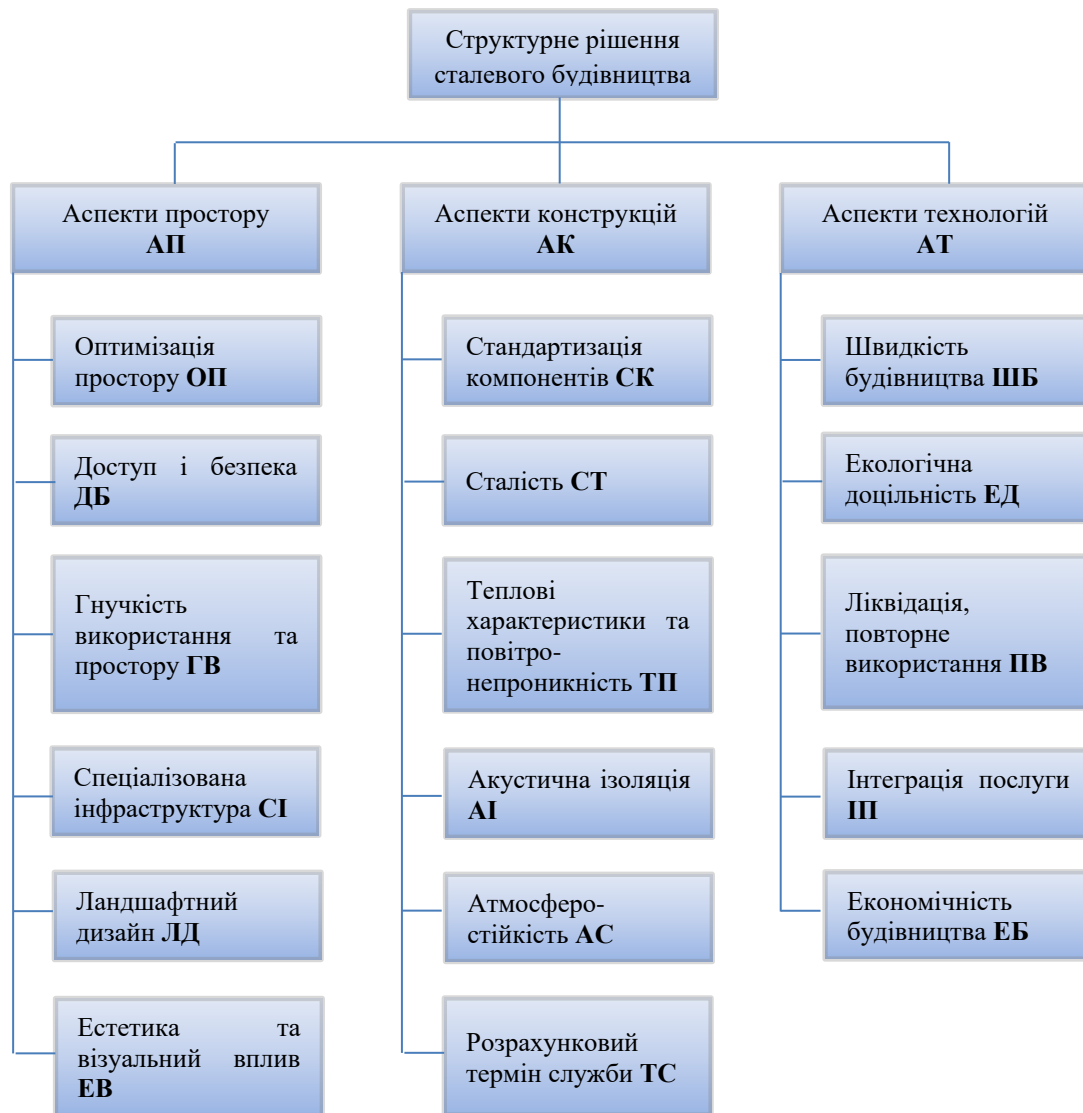


Рис. 1. Основні аспекти, на які слід зважати при концептуальному проектуванні промислових сталевих будівель

Міркування щодо покращень простору стосуються:

- оптимізації простору (ОП);
- доступу і безпеки (ДБ);
- гнучкості використання та простору (ГВ);
- спеціалізованої інфраструктури (СІ);
- ландшафтного дизайну (ЛД);
- естетики та візуального впливу (ЕВ).

Наступна група ознак, на що слід звертати увагу стосується елементів конструкції:

- стандартизація компонентів (СК);
- сталість (СТ);
- теплові характеристики та повітро-непроникність (ТП);

- акустична ізоляція (АІ);
- атмосферостійкість (АС);
- розрахунковий термін служби (ТС).

Третя група ознак відноситься до аспектів технології:

- швидкість будівництва (ШБ);
- економічність будівництва (ЕБ);
- екологічна ефективність (ЕЕ);
- ліквідація, повторне використання (ПВ);
- інтеграція послуги (ІП).

Оптимізація проектних рішень будівель із застосуванням сталі повинна забезпечити баланс між просторовою ефективністю, конструктивною стійкістю і довговічністю та технологічною економічністю.

Припустимо можливі три варіанти (альтернативи) структурно-компоновочних рішень проєкту складської будівлі (табл. 2):

A1 Базовий корпус – Сталева рама порталу;

A2 Клеєні балки та прогоны, що спираються на бетонні колони;

A3 Сталева рама порталу з світловими ліхтарями.

Подальші дослідження ґрунтовані на порівнянні варіантів представлених у роботі [10].

Таблиця 2

Порівняльна вартість альтернативних структурних проєктів

Структурний варіант	Опис	Вартість складу		Офісні витрати		Загальний план витрат <sup>1</sup>	Загальна вартість одиниці будівлі	Різниця відносно базового варіанту
		(£k)	(£/m <sup>2</sup> GIFA)	(£k)	(£/m <sup>2</sup> GIFA)			
Базовий корпус	Сталева рама порталу	14,700	432	1,641	1,180	19,441	549	–
Варіант 1	Клеєні балки та прогоны, що спираються на бетонні колони	17,000	500	1,649	1,185	21,749	615	+12
Варіант 2	Сталева рама порталу з світловими ліхтарями	16,300	479	1,641	1,180	21,041	595	+8

<sup>1</sup> Включає вартість будівельних робіт у розмірі 3 100 000 фунтів стерлінгів

Щоб максимально врахувати потреби клієнта (власника, майбутнього користувача), об'єднати і збалансувати всі аспекти структурного проєкту, можемо застосовувати метод аналізу ієрархії [9; 10].

Метод (MAI) застосовується для вирішення неструктурованих і слабоструктурованих проблем.

У методі аналізу ієрархій елементи порівнюють попарно відносно їх впливу (більшої чи меншої важливості) на загальні для них показники (цілі і підцілі), що має на меті досягнути власник проєкту девелопменту.

Для отримання позитивних результатів у порівняннях необхідно:

1. Обрати числову (або ж нечітку) шкалу порівнянь;
2. Визначити ступінь неузгодженості суджень.

Таблицю парних порівнянь можемо записати у вигляді зворотно симетричної матриці:

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

в якій  $a_{ij} = 1/a_{ji}$

Коли задача наведена у вигляді ієрархічної структури, матриця складається для парного порівняння критеріїв (цілей) на другому рівні відносно спільної мети, розташованої на першому рівні.

Такі ж матриці будують для парних порівнянь кожної альтернативи відносно критеріїв другого рівня ієрархії.

Оцінювання відповідності альтернатив щодо спільної (головної) мети виконується в три етапи:

1. Оцінюється відповідність альтернатив підкритеріям (підцілям) на третьому рівні.
2. Оцінюється відповідність альтернатив критеріям (цілям) на другому рівні ієрархії.
3. Оцінюється відповідність альтернатив спільній (головній) меті.

В нашій задачі цілі (простір; конструкція; технологія) утворюють другий рівень ієрархії. У свою чергу цілі залежать від підцілей.

Створення ієрархічної моделі задачі.

У цій задачі варіанти альтернативних структурних проєктів (табл. 2) це:

- сталева рама порталу – базовий варіант;
- клеєні балки та прогоны, що спираються на бетонні колони – перша альтернатива;

– сталевая рама портала з світловими ліхтарями – друга альтернатива.

Альтернативи різняться між собою вмістом проектно-конструктивного рішення

і утворюють четвертий (нижчий рівень) ієрархії (рис. 2).

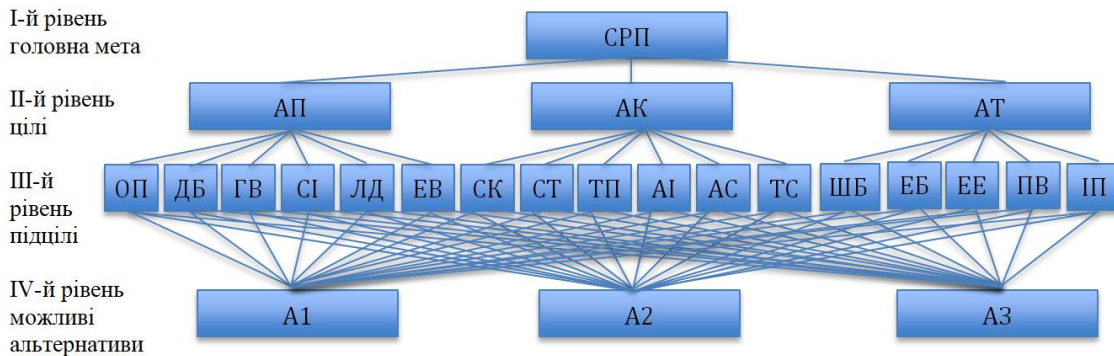


Рис. 2. Структурне рішення проекту

Цілі (простір, конструкція, технологія) утворюють другий рівень ієрархії.

У свою чергу цілі залежать від сукупності і інтенсивності прояву підцілей.

Наприклад, якість простору залежить від ознак що характеризують:

- оптимізацію простору;
- доступ і безпеку;
- гнучкість використання та простору;
- спеціалізованої інфраструктури;
- ландшафтного дизайну;
- естетики та візуального впливу.

Ієрархічна модель задачі показана на рисунку 2. Задача реалізується поетапно:

1. Подання проблеми у вигляді ієрархії.

2. Встановлення пріоритетів (критеріїв та підкритеріїв); оцінювання кожної альтернативи за критеріями, вибір з них найбільш відповідної (важливої).

Унікальність типу структурного проекту визначається якістю простору, ефективністю конструкції, економічністю технології.

Замовник (майбутній користувач, власник) визначає свої пріоритети і доцільність альтернатив проектного рішення, які між собою відрізняються структурно-конструктивним вмістом.

Алгоритм дій для обґрунтування структурно-конструктивного вмісту на основі системи цілей і пріоритетів виконують в такій послідовності:

1. Створити базову концепцію корпусу складської будівлі на основі власного

концептуального уявлення, яким характеристикам і функціям повинна відповідати будівля (з урахуванням кращої практики і регіональних особливостей).

2. Запропонувати 2–3 варіанти можливих альтернатив вмісту проектно-структурного рішення будівлі.

3. Визначити різноманіття елементів (ознак) простору, конструкції, технології. Відповідних відмінностей. Представити задачу у вигляді ієрархії. Побудувати систему критеріїв і пріоритетів.

4. Застосувати метод аналізу ієрархій.

5. Спираючись на переваги і важливість ознак, розглянути альтернативи на відповідність критичним характеристикам і вимогам, визначеним замовником (клієнтом), і порівняти альтернативні структурні проекти.

### Висновок

Викладене дослідження містить практичний приклад порівняльної оцінки альтернативних варіантів структурних рішень промислової сталевий будівлі.

Отримані результати можуть бути використані власниками, девелоперами, проектувальниками та будівельними організаціями для обґрунтованого вибору концептуальних структурних рішень сталевих промислових будівель з урахуванням економічних, експлуатаційних та технологічних пріоритетів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Піднятися з руїн. Як війна вдарила по економіці України та скільки втратив бізнес [Електронний ресурс]. URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/pidnyatisya-ruyin-k-viyna-vdarila-ekonomitsi-1737472759.html> (дата звернення : 10.12.2025).
2. Білоконь А. І., Кислиця Л. В. Основні тенденції та перспективи в галузі промислового сталевих будівництва. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 5 (029). С. 25–37. URL: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.051125.25.1188>
3. Steel Construction Institute. Кращі практики в сталевому будівництві – промислові будівлі. [Електронний ресурс]. Брекнелл. URL: [https://constructalia.arcelormittal.com/files/Industrial\\_EN\\_Lowres--c3e931574ac1d0f586c79e0f97d43ad7.pdf](https://constructalia.arcelormittal.com/files/Industrial_EN_Lowres--c3e931574ac1d0f586c79e0f97d43ad7.pdf) (дата звернення : 10.12.2025).
4. Австралійський інститут сталі. Практичний посібник з планування безпечного зведення сталевих конструкцій. [Електронний ресурс]. Пімбл. URL: [https://www.steel.org.au/ASI/media/Australian-Steel-Institute/PDFs/Practical-Guide-to-Planning-the-Safe-Erection-of-Steel-Structures\\_v3\\_FINAL.pdf](https://www.steel.org.au/ASI/media/Australian-Steel-Institute/PDFs/Practical-Guide-to-Planning-the-Safe-Erection-of-Steel-Structures_v3_FINAL.pdf) (дата звернення : 10.12.2025).
5. Steel Construction Institute. Одноповерхові будівлі – рекомендації щодо найкращої практики для розробників, власників, дизайнерів і конструкторів. [Електронний ресурс]. Брекнелл. URL: [https://steelconstruction.info/images/f/f8/SCI\\_P347.pdf](https://steelconstruction.info/images/f/f8/SCI_P347.pdf) (дата звернення : 10.12.2025).
6. Белоконов А. И., Маланчий С. А., Коцюба Т. В. Теоретические аспекты определения и взаимодействия заинтересованных групп лиц в проектах. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 1 (214). С. 72–78.
7. Белоконов А. И., Маланчий С. А., Коцюба Т. В. Управление заинтересованными сторонами в окружении проекта. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 4 (217). С. 64–72.
8. Tata Steel, BCSA, AECOM, Sweett Group. Керівництво з проектування та будівництва стійких складських будівель з низьким вмістом вуглецю. [Електронний ресурс]. Міжнародне видання. URL: [https://steelconstruction.info/images/b/be/Warehouse\\_guidance\\_doc\\_v2.pdf](https://steelconstruction.info/images/b/be/Warehouse_guidance_doc_v2.pdf) (дата звернення : 10.12.2025).
9. Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.
10. Saaty T. L., Vargas L. G. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. New York : Springer Science & Business Media, 2012. 346 p.

## REFERENCES

1. *Pidnyatysya z ruyin. Yak viyna vdaryla po ekonomitsi Ukrainy ta skil'ky vtratyv biznes* [Rising from the Ruins: How the War Hit Ukraine's Economy and Business Losses]. [Online]. URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/pidnyatisya-ruyin-k-viyna-vdarila-ekonomitsi-1737472759.html> (accessed : 10 December 2025). (in Ukrainian).
2. Bilokon A.I. and Kyslytsia L.V. *Osnovni tendentsiyi ta perspektyvy v haluzi promyslovoho stalevoho budivnytstva* [Main Trends and Prospects in the Field of Industrial Steel Construction]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2025, no. 5 (029), pp. 25–37. URL: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.051125.25.1188>. (in Ukrainian).
3. *Steel Construction Institute. Krashchi praktyky v stalevomu budivnytstvi – promyslovi budivli* [Steel Construction Institute. Best Practice in Steel Construction – Industrial Buildings]. [Online]. Bracknell. URL: [https://constructalia.arcelormittal.com/files/Industrial\\_EN\\_Lowres--c3e931574ac1d0f586c79e0f97d43ad7.pdf](https://constructalia.arcelormittal.com/files/Industrial_EN_Lowres--c3e931574ac1d0f586c79e0f97d43ad7.pdf) (accessed : 10 December 2025). (in Ukrainian).
4. *Avstraliys'kyi instytut stali. Praktychnyy posibnyk z planuvannya bezpechnoho zvedennya stalevykh konstruksiy* [Australian Steel Institute. Practical Guide to Planning the Safe Erection of Steel Structures]. [Online]. Pymble. URL: [https://www.steel.org.au/ASI/media/Australian-Steel-Institute/PDFs/Practical-Guide-to-Planning-the-Safe-Erection-of-Steel-Structures\\_v3\\_FINAL.pdf](https://www.steel.org.au/ASI/media/Australian-Steel-Institute/PDFs/Practical-Guide-to-Planning-the-Safe-Erection-of-Steel-Structures_v3_FINAL.pdf) (accessed : 10 December 2025). (in Ukrainian).
5. *Steel Construction Institute. Odnopoverkhovi budivli – rekomendatsiyi shchodo naykrashchoyi praktyky dlya rozrobnikiv, vlasnykiv, dyzayneriv i konstruktoriv* [Steel Construction Institute. Single-Storey Buildings – Best Practice Guidance for Developers, Owners, Designers and Constructors]. [Online]. Bracknell. URL: [https://steelconstruction.info/images/f/f8/SCI\\_P347.pdf](https://steelconstruction.info/images/f/f8/SCI_P347.pdf) (accessed : 10 December 2025). (in Ukrainian).
6. Belokon A.I., Malanchii S.A. and Kotsiuba T.V. *Teoretycheskiye aspekty opredeleniya y vzaymodeystviya zainteresovannykh hrupp lyts v proektakh* [Theoretical Aspects of Identifying and Interaction of Stakeholder Groups in Projects]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 1 (214), pp. 72–78. (in Russian).
7. Belokon A.I., Malanchii S.A. and Kotsiuba T.V. *Upravleniye zainteresovannymi storonami v okruzenii proyekta* [Stakeholder Management in the Project Environment]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 4 (217), pp. 64–72. (in Russian).

8. *Tata Steel, BCSA, AECOM, Sweett Group. Kerivnytstvo z proektuvannya ta budivnytstva stiykykh sklads'kykh budivel' z nyz'kym vmistom vuhletsyu* [Tata Steel, BCSA, AECOM, Sweett Group. Low Carbon Warehouse Buildings : Design and Construction Guidance]. [Online]. International edition. URL: [https://steelconstruction.info/images/b/be/Warehouse\\_guidance\\_doc\\_v2.pdf](https://steelconstruction.info/images/b/be/Warehouse_guidance_doc_v2.pdf) (accessed : 10 December 2025). (in Ukrainian).

9. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York : McGraw-Hill, 1980, 287 p.

10. Saaty T.L. and Vargas L.G. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. New York : Springer Science & Business Media, 2012, 346 p.

Надійшла до редакції: 13.02.2026.

Прийнято після рецензування: 01.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 519.6:502.3:504.3

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.39.1241

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ТА МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗАХИСНОГО ЕКРАНУ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

БІЛЯЄВ М. М.<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, проф.,

ГІЛЬОВ В. В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

КІРІЧЕНКО П. С., канд. техн. наук, доц.

КОЗАЧИНА В. А.<sup>4\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ТИМОШЕНКО О. А.<sup>5</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: [biliaiev.m@gmail.com](mailto:biliaiev.m@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

<sup>2</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [hilyov.v@pdaba.edu.ua](mailto:hilyov.v@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3014-5820>

<sup>3</sup> Кафедра теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляції, Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, 50027, Кривий Ріг, Україна, тел. +38 (056) 409-06-06, e-mail: [pasha\\_129@ukr.net](mailto:pasha_129@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-0793-9593>

<sup>4\*</sup> Кафедра матеріалознавства, механіки та природничих наук, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Південне шосе, 80, 69008, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: [v.kozachyna@gmail.com](mailto:v.kozachyna@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

<sup>5</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3114-9820>

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Для захисту повітря від пилового та хімічного забруднення на промислових майданчиках широко використовуються захисні екрани. Ці екрани створюють перешкоди на шляху руху вітрового потоку, що сприяє зменшенню рівня забруднення повітря в робочих зонах. Ефективне використання захисних екранів потребує знання про закономірності аеродинаміки потоків за ним. **Мета роботи.** Експериментальне та теоретичне дослідження аеродинаміки потоків на промисловому майданчику при використанні захисного екрану складної геометричної форми. **Методика.** Дослідження проводилися в два етапи. На першому етапі проведений експеримент де визначалися закономірності руху повітряних потоків за екраном, що має складну геометричну форму. На другому етапі розроблена CFD модель для визначення інтенсивності пилового забруднення на промисловому майданчику. Розроблена CFD модель дає можливість швидко визначати концентраційне поле пилу в повітрі при використанні захисного екрану на промисловому майданчику. **Наукова новизна.** Проведені експериментальні дослідження по визначенню закономірностей аеродинаміки при використанні захисного екрану складної форми на промисловому майданчику. Розроблена CFD модель прогнозування пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при використанні захисного екрану складної форми. **Практична значущість.** Отримані емпіричні моделі для оцінювання швидкості повітряного потоку за захисним екраном складної форми, що можуть бути використані для оцінювання ефективності його використання. Розроблена CFD модель може бути використана на етапі проектування «фор ескіз» для обґрунтування параметрів захисного екрану. **Висновки.** Проведені експерименти, що визначили закономірності аеродинаміки потоків на промисловому майданчику при застосуванні захисного складної форми. Отримані емпіричні моделі, що дають можливість визначати швидкість повітряного потоку за захисним екраном. Розроблена CFD модель, що дає можливість прогнозувати ефективність використання захисного екрану складної форми. Представлені результати фізичного та обчислювального експериментів.

**Ключові слова:** захист повітря від забруднення; захисний екран; математичне моделювання; робоча зона; гідродинаміка потоків

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF AERODYNAMICS AND MASS TRANSFER USING A PROTECTIVE SCREEN OF COMPLEX GEOMETRIC SHAPE

BILIAIEV M.M.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
HILOV V.V.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
KIRICHENKO P.S.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
KOZACHYNA V.A.<sup>4\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
TYMOSHENKO O.A.<sup>5</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: [biliaiev.m@gmail.com](mailto:biliaiev.m@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

<sup>2</sup> Department of Labor Protection, Civil and Environmental Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [hilyov.v@pdaba.edu.ua](mailto:hilyov.v@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3014-5820>

<sup>3</sup> Department of Heat and Gas Supply, Drainage and Ventilation, Kryvyi Rih National University, 11, Vitaly Matusевич St., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, tel. +38 (056) 409-06-06, e-mail: [pasha\\_129@ukr.net](mailto:pasha_129@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-0793-9593>

<sup>4\*</sup> Department of Materials Science, Mechanics and Natural Sciences, LLC “Technical University “METINVEST POLYTECHNIC””, 80, Southern Highway, Zaporizhzhia, 69008, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: [v.kozachyna@gmail.com](mailto:v.kozachyna@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

<sup>5</sup> Department of Labor Protection, Civil and Environmental Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3114-9820>

**Abstract. Problem statement.** Protective screens are widely used to protect the air from dust and chemical pollution at industrial sites. These screens create obstacles in the path of wind flow, which helps reduce the level of air pollution in work areas. Effective use of protective screens requires knowledge of the aerodynamics of the flows behind them. **The purpose of the article.** Experimental and theoretical study of the aerodynamics of flows at an industrial site when using a protective screen of complex geometric shape. **Methodology.** The research was conducted in two stages. At the first stage, an experiment was conducted to determine the patterns of air flow behind a screen with a complex geometric shape. At the second stage, a CFD model was developed to determine the intensity of dust pollution at an industrial site. The developed CFD model makes it possible to quickly determine the concentration field of dust in the air when using a protective screen at an industrial site. **Scientific novelty.** Experimental studies have been conducted to determine the aerodynamic patterns when using a protective screen of complex shape at an industrial site. A CFD model for predicting dust air pollution at an industrial site when using a protective screen of complex shape has been developed. **Practical significance.** Empirical models for estimating the air flow velocity behind a complex-shaped protective screen have been obtained, which can be used to assess the effectiveness of its use. The developed CFD model can be used at the design stage of the “fore sketch” to justify the parameters of the protective screen. **Conclusions.** Experiments were conducted to determine the aerodynamic patterns of flows at an industrial site when using a protective screen of complex shape. Empirical models were obtained that make it possible to determine the speed of the air flow behind the protective screen. A CFD model was developed that makes it possible to predict the effectiveness of using a protective screen of complex shape. The results of physical and computational experiments are presented.

**Keywords:** *air protection from pollution; protective screen; mathematical modeling; working area; hydrodynamics of flows*

**Постановка проблеми.** Інтенсивне пилове забруднення повітря в робочих зонах має місце в різних галузях промисловості. В світі значна увага приділяється використанню захисних екранів на промислових майданчиках [1; 4] (рис. 1). Захисні екрани мають суттєві переваги: дозволяють здійснити ефективний захист повітря від пилового та хімічного забруднення; ці захисні споруди прості, економічні, установка екранів може бути здійснена дуже швидко. Важливим аспектом є те, що в якості матеріалу для виготовлення захисних екранів можна використовувати відходи промисловості.

Але для практичного використання екранів, для конкретних умов експлуатації, потрібно, заздалегідь, визначити їх ефективність. Для рішення цієї важливої задачі використовують експериментальні так і теоретичні методи дослідження [1; 5–7; 9]. В останній час значна увага приділяється використанню захисних екранів складної геометричної форми. Тому наукові дослідження в напрямку визначення закономірностей впливу таких екранів на аеродинаміку потоків на промислових майданчиках є актуальною проблемою.



Рис. 1. Захисний екран на промисловому майданчику

<https://www.windbreakpanels.com/product/windbreak-wall.html>

**Мета статті** – експериментальне та теоретичне дослідження аеродинаміки потоків та масопереносу на промисловому майданчику при використанні захисного екрану складної геометричної форми.

**Методика.** На першому етапі дослідження здійснювався аналіз впливу захисного екрану на аеродинаміку потоку, коли вертикальний екран має додатковий елемент типу «шафа», який розташований «проти потоку» (рис. 2). Дослідження проводилося експериментальним шляхом.

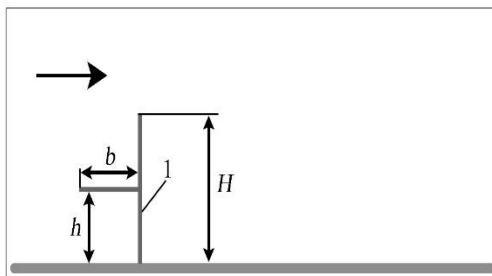


Рис. 2. Схема фізичної моделі захисного екрану:  
1 – екран ( $H = 10$  см,  $h = 5$  см,  $b = 5$  см)

Ширина моделі захисного екрану 10 см, довжина додаткового елемента «шафа» 5 см, висота розташування цього елемента 5 см (рис. 3). Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалось за допомогою анемометра НТ-9830.

Як характерний розмір прийнято висота екрану  $H = 10$  см. Моделювання здійснювалось за критерієм Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_0 H}{\nu}$$

де  $V_0$  – швидкість повітряного потоку перед бар'єром (визначалась шляхом вимірювання на висоті  $0,5H$  та відстані  $H$  перед екраном);  $H$  – характерний розмір;  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості ( $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Експеримент проводився для різної швидкості повітряного потоку в два етапи:

- Етап 1: визначення швидкості повітряного потоку безпосередньо за захисним екраном (на висоті  $0,1H$  та відстані  $0,5H$  від бар'єру).

- Етап 2: визначення швидкості повітряного потоку на різній відстані від захисного екрану (на висоті  $0,1H$ ).

На рисунку 4 показано значення швидкості повітряного потоку за екраном. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті  $0,1H$ .



Рис. 3. Фото моделі захисного екрану

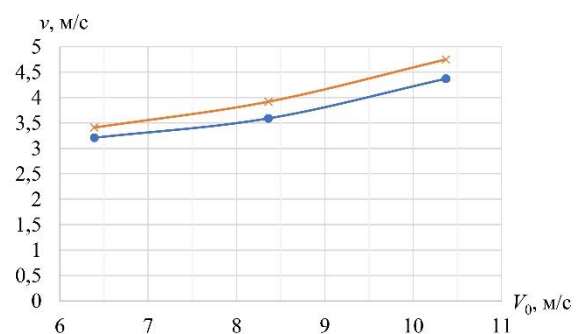


Рис. 4. Швидкість повітряного потоку за екраном:  
× – розрахунок за розробленою моделлю

Обробка експериментальних даних дає можливість отримати наступну емпіричну модель, що можуть бути використана для оцінювання швидкості повітряного потоку

за даним захисним екраном (на висоті  $0,1H$  та відстані  $0,5H$  від бар'єру):

$$v = 0,049V_0^2 - 0,5304 \cdot V_0 + 4,597,$$

де  $V_0$  – швидкість повітряного потоку перед екраном.

Далі на рисунку 5 показано зміну значення швидкості повітряного потоку за захисним екраном вздовж моделі промислового майданчику. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті  $0,1H$ .

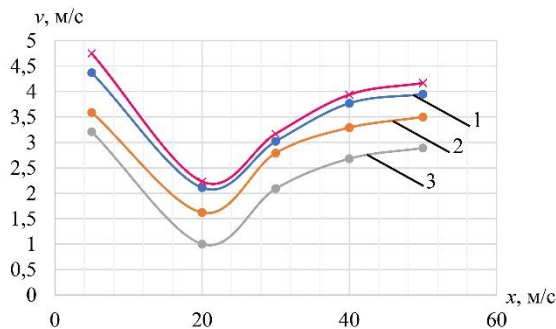


Рис. 5. Зміна швидкості повітряного потоку за «екраном потоку»: 1 – 10,37 м/с; 2 – 8,36 м/с; 3 – 6,39 м/с, × – розрахунок за розробленою моделлю ( $V_0 = 10,37$  м/с)

Результати, що наведено на рисунку 5, дають можливість встановити таку закономірність: за захисним екраном швидкість повітряного потоку зменшується та досягає мінімуму на відстані  $2H$  від захисного екрану, а далі починається зростання локальної швидкості повітряного потоку.

На наступному етапі була розроблена CFD модель для аналізу процесів аеродинаміки та масопереносу пилу при використанні на промисловому майданчику захисного екрану, що має складну форму.

Для рішення задачі аеродинаміки використовувалася модель потенціального руху:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

де  $P$  – потенціал швидкості.

Граничні умови для даного рівняння розглянуто в [1; 2; 4].

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа попередньо його записано в еволюційному вигляді:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (2)$$

де  $t$  – фіктивний час.

Для розв'язання даного рівняння застосовується така різницева схема:

$$P_{ij}^{n+1} = P_{ij}^n + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^n - 2P_{ij}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^n - 2P_{ij}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}.$$

Крім даної розрахункової залежності також використовувалася інша різницева схема розщеплення для чисельного інтегрування рівняння (2). Це двукрокова змінно- трикутна схема:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right].$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Після розрахунку потенціалу швидкості розраховувалися компоненти вектору швидкості повітряного потоку за наступними формулами :

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Процес поширення пилу в повітрі моделювався за допомогою наступного рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $C$  – концентрація пилу в повітрі,  $u, v$  – складові вектору швидкості вітру,  $x_i, y_i$  – декартові координати джерела емісії пилу,  $t$  – час,  $\mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти турбулентної

дифузії в атмосфері,  $\delta(x_i-x)\delta(y_i-y)$  – дельта-функція Дірака,  $Q$  – інтенсивність емісії пилу,  $w$  – швидкість гравітаційного осадження пилу.

Коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері визначаються наступним чином:

$$\mu_x = 0,1 \cdot u, \quad \mu_y = 0,1 \cdot v.$$

Чисельне інтегрування рівняння (3) здійснюється за допомогою схем розщеплення [1–3]. Здійснена програмна реалізація розроблених чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу.

**Результати математичного моделювання.** Нижче показано результати моделювання на базі розроблених чисельних моделей. Розглядався процес переносу пилу на промисловому майданчику при розташуванні екрану даного типу. Розміри розрахункової області  $25 \times 10,5$  м; швидкість вітру 5 м/с; довжина області пилоутворення 6 м; інтенсивність пилоутворення 100 од (в безрозмірному вигляді); ширина екрану 1 м; висота екрану 5 м; довжина горизонтального елемента 2 м; швидкість гравітаційного осадження часток пилу 1,5 см/с.

Схему розрахункової області показано на рисунку 6. Концентрація пилу наведена в безрозмірному вигляді: кожне число показує у відсотках значення концентрації пилу від її максимального значення. Таким чином, числу «99» відповідає максимальне значення концентрації пилу.

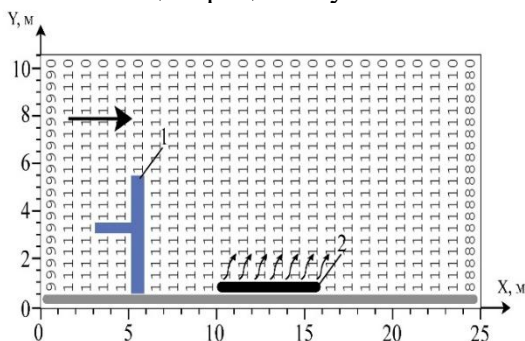


Рис. 6. Схema розрахункової області:  
1 – екран з горизонтальним елементом;  
2 – область пилоутворення

Нижче на рисунку показано поле концентрації пилу в області дослідження. Концентрація пилу наведена в

безрозмірному вигляді: кожне число показує у відсотках значення концентрації пилу від її максимального значення; числу «99» відповідає максимальне значення концентрації пилу.

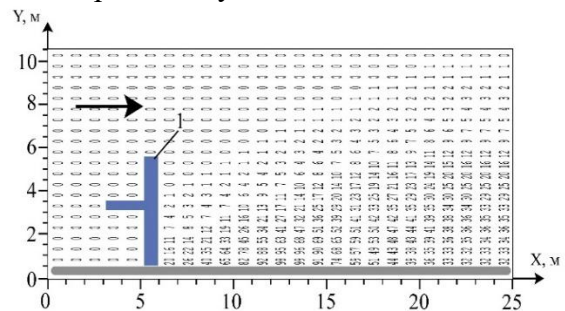


Рис. 7. Поле концентрації пилу на промисловому майданчику: 1 – захисний екран

Аналіз даних, що наведено на рисунку 7, показує, що при використанні захисного бар'єру даного типу, на відстані порядку 20 м від бар'єру, формується область забруднення, яка вище висоти бар'єру. На відстані порядку 20 м від бар'єру, в межах 2 м від поверхні майданчика, концентрація пилу в повітрі дорівнює 30–36 % від максимальної концентрації. Форма області пилового забруднення – це «шлейф», що притискається до поверхні землі.

Відзначимо, що час розрахунку складає 2 с.

**Наукова новизна та практична цінність.** Проведені експериментальні дослідження по визначенню закономірностей аеродинаміки при використанні захисного екрану складної форми на промисловому майданчику.

Розроблена CFD модель прогнозування пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при використанні захисного екрану складної форми.

### Висновки

1. Проведені експерименти, які визначили закономірності аеродинаміки потоків на промисловому майданчику при застосуванні захисного екрану складної форми.

2. Отримані емпіричні моделі, що дають можливість визначати швидкість повітряного потоку за захисним екраном.

3. Розроблено CFD модель, що дає можливість прогнозувати ефективність використання захисного екрану складної форми.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. *CFD-моделирование в анализе эффективности систем защиты докілья та працівників на робочих місцях* : монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
3. Самарский А. А. Теория разностных схем. 1983. 616 с.
4. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., & Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. *Transport Problems*. Vol. 16 (2), part 1. 2021. Pp. 73–86. URL: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-024>
5. Brolin N. Development of Curved Noise and NOx Barrier. Master of Science Thesis, KTH Industrial Engineering and Management. Stockholm, Sweden, 2010. Digitala Vetenskapliga Arkivet. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444437/FULLTEXT01.pdf>
6. Hagler G. S. W. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. 2011. Vol. 45 (15). Pp. 2522–2530. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>
7. Jeong S. J. Effect of Double Noise-Barrier on Air Pollution Dispersion around Road, Using CFD. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 8 (2). Pp. 81–88. URL: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201420947475958.pdf>
8. Nico Schulte, Akula Venkatram. *Effects of Sound Barriers on Dispersion from Roadways*. DRAFT. Final Report. June 17, 2013. 100 p.
9. Wonsik C., Shishan Hu, Meilu He, Kozawa K. Spatial Heterogeneity of Roadway Pollutant in Los Angeles. URL: [http://www.aqmd.gov/docs/default-source/technologyresearch/TechnologyForums/near-road-mitigationmeasures/near\\_road\\_mitigation-agenda-presentations.pdf](http://www.aqmd.gov/docs/default-source/technologyresearch/TechnologyForums/near-road-mitigationmeasures/near_road_mitigation-agenda-presentations.pdf)

### REFERENCES

1. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V. and Kozachyna V.A. *CFD-modelyuvannya v analizi efektyvnosti system zaxystu dokilliya ta pracivnykiv na robochyx miscyax : monografiya* [CFD modeling in the analysis of the effectiveness of environmental protection systems and workers at workplaces : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2022, 268 p. (in Ukrainian).
2. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka, 1997, 368 p. (in Russian).
3. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. 1983, 616 p. (in Russian).
4. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V. and Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. *Transport Problems*. 2021, vol. 16 (2), part 1, pp. 73–86. URL: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-024>
5. Brolin N. Development of Curved Noise and NOx Barrier. Master of Science Thesis, KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden, 2010, Digitala Vetenskapliga Arkivet. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444437/FULLTEXT01.pdf>
6. Hagler G.S.W. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. 2011, vol. 45 (15), pp. 2522–2530. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>
7. Jeong S.J. Effect of Double Noise-Barrier on Air Pollution Dispersion around Road, Using CFD. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2013, vol. 8 (2), pp. 81–88. URL: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201420947475958.pdf>
8. Nico Schulte and Akula Venkatram. *Effects of Sound Barriers on Dispersion from Roadways*. DRAFT. Final Report. June 17, 2013, 100 p.
9. Wonsik C., Shishan Hu, Meilu He and Kozawa K. Spatial Heterogeneity of Roadway Pollutant in Los Angeles. URL: [http://www.aqmd.gov/docs/default-source/technologyresearch/TechnologyForums/near-road-mitigationmeasures/near\\_road\\_mitigation-agenda-presentations.pdf](http://www.aqmd.gov/docs/default-source/technologyresearch/TechnologyForums/near-road-mitigationmeasures/near_road_mitigation-agenda-presentations.pdf)

Надійшла до редакції: 20.03.2026.

Прийнято після рецензування: 20.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 711.11

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.45.1242

## МІСТО ЯК ПАРАДОКС

ВОРОБІЙОВ В. В.<sup>1\*</sup>, канд. арх., доц.,  
ШИЛО О. С.<sup>2</sup>, ст. виклад.

<sup>1\*</sup> Кафедра архітектурного проєктування та містобудування, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (068) 424-98-19, e-mail: [vivavo151151@gmail.com](mailto:vivavo151151@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-1539-3196>

<sup>2</sup> Кафедра архітектурного проєктування та містобудування, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 212-48-80, e-mail: [olgashilo2016@gmail.com](mailto:olgashilo2016@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-9869-5474>

**Анотація. Постановка проблеми.** Сучасна теорія містобудування розвивається вкрай повільно. Вона не відразу сприймає нові зміни в планувальній і об'ємно-просторовій структурі міста, а чекає їх підтвердження в пространстві і часі. Теорія містобудування формується на перетині великої кількості різних областей знань, кількість яких постійно змінюється. Від одних ця теорія відмовляється, інші приймає до свого аарсеналу і використовує як важливі, що підлягають обліку на наступних етапах свого розвитку. Кандидатських та докторських дисертацій з різних аспектів містобудування в Україні, починаючи з 1991 року – року набуття нею Незалежності, так не зрозуміло мало, а їх теми, найчастіше, так не суттєві, так мало що дають для теорії та практики і, що найголовніше, обходять стороною справді принципові аспекти формування міста, що саме собою вже є парадоксом. Дослідники стикаються з проблемою нерозуміння об'єкта дослідження – сучасного міста. Тому їй не беруться за такі не підйомні теми. У підручниках з основ містобудування описані деякі «так звані» «закономірності», які спостерігаються на рівні генерального плану міста. А також його забудови. Вони застосовуються під час вирішення мережевих, балансових та інших графо-аналитических завдань лише на рівні генерального плану міста. Чи не всі ці математичні закономірності зводяться «лише» до двох алгоритмів розрахунків, що базуються на лінійній логіці: розрахунків на основі принципів електричних мереж та розрахунків на основі принципів гравітаційного тяжіння між об'єктами містобудування. Вирішення завдань на основі нелінійних залежностей, досі немає. Проте аналіз містобудівних процесів показує, що мережеві, балансіві та інші завдання не прагнуть підчинитися цим правилам, а містобудівні процеси діють на основі правил парадоксів, що заперечують логіку причинно-наслідкових зв'язків між містобудівними об'єктами та процесами. Тобто виникають та функціонують на межі їхнього розуміння людиною. Загальноприйняті правила тут не працюють, а нові ще невідомі. Парадокси не вкладаються в «прокрустове ложе» логіки і так званого лівопівкульного здорового глузду. Вони алогічні. **Мета цієї статті** – розкрити суть парадоксів у містобудуванні.

**Ключові слова:** сучасне місто; містобудівні парадокси; алогізм містобудівних парадоксів; відсутність закономірностей у генеральному плані; відсутність закономірностей у забудові

## THE CITY AS A PARADOX

VOROBIOV V.V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Arch.), Assoc. Prof.*,  
SHYLO O.S., *Assist. of Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Architectural Design and Urban Planning, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (068) 424-98-19, e-mail: [vivavo151151@gmail.com](mailto:vivavo151151@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-1539-3196>

<sup>2</sup> Department of Architectural Design and Urban Planning, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (098) 212-48-80, e-mail: [olgashilo2016@gmail.com](mailto:olgashilo2016@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-9869-5474>

**Abstract. Statement of the problem.** Modern theory of urban development develops extremely slowly. It does not immediately perceive the newly emerging changes in the planning and spatial structure of the city, but waits for their confirmation in space and time. The theory of urban development is formed at the intersection of a large number of very different fields of knowledge, the number of which is constantly changing. This theory rejects some, accepts others into its arsenal and uses them as important, subject to consideration at subsequent stages of its development. There are so inexplicably few candidate and doctoral dissertations on various aspects of urban development in Ukraine since 1991, the year it gained independence, and their topics are often so insignificant, so little that contributes to theory and practice and,

most importantly, bypasses the truly fundamental aspects of the formation of the city, which in itself is a paradox. Researchers are faced with the problem of not understanding the object of study – the modern city. That is why they do not “take on” such unwieldy topics. In textbooks on the basics of urban development, some “so-called” “regularities” are described, which are observed at the level of the city's general plan. And also its development. They are used in solving network, balance and other graph-analytical problems at the level of the city's general plan. Almost all of these mathematical regularities can be reduced to “only” two calculation algorithms based on linear logic: calculations based on the principles of electrical networks and calculations based on the principles of gravitational attraction between urban development objects. There are still no solutions to problems based on nonlinear dependencies. However, the analysis of urban development processes shows that network, balance and other problems do not tend to obey these rules, and urban development processes operate on the basis of paradox rules that deny the logic of cause-and-effect relationships between urban development objects and processes. That is, they arise and function at the border of their human understanding. Generally accepted rules no longer work here, and new ones are still unknown. Paradoxes do not fit into the “Procrustean bed” of logic and the so-called left-hemisphere common sense. They are illogical. *The purpose of this article* is to reveal the essence of paradoxes in urban planning.

**Keywords:** *modern city; urban planning paradoxes; illogicality of urban planning paradoxes; lack of regularities in the general plan; lack of regularities in development*

*Парадокс – явище, що суперечить нормальним уявленням, що не відповідає природним очікуванням.  
Парадокси стали користуватися популярністю ще в Стародавню Грецію. Тутешні мудреці, використовуючи логічні висновки, роками займалися пошуками НЕІСНУЮЧИХ ВІДПОВІДЕЙ НА ФАТАЛЬНІ ПАРАДОКСИ.  
ПАРАДОКС – це перехід у НОВУ РЕАЛЬНІСТЬ, це ШЛЯХ.  
ЦЬОГО НЕМАЄ, АЛЕ САМЕ ТАК ЦЕ І ВІДБУВАЄТЬСЯ.*

**Постановка проблеми.** Публікації, присвячені різним аспектам функціонально-планувальної та об'ємно-просторової структури міста, що живе в тому чи іншому регіональному просторі та часі, спираються на широкий спектр знань про природу, соціум, медицину, екологію, інженерію, економіку, естетику, на знання, сформовані десятками інших сучасних наук [5; 6; 9]. Знання використовуються архітекторами у містобудівному проектуванні.

Певна їх частина введена у структуру державних норм і правил, а також інших регламентуючих документів. Тобто наділена статусом закону, який підлягає виконанню.

Зрозуміло, вся ця бюрократична система містобудівних рефлексій перебуває у стані частого епізодичного оновлення, що здається об'єктивним, оскільки як дискретно, так і континуально розвиваються та змінюються всі ендогенні, екзогенні та антропогенні фактори фізичного світу та міст як його компонентів.

Процес змін у структурі міст традиційно розглядається виключно з позиції причинно-

наслідкових зв'язків між усіма елементами та процесами геосфери та антропосфери.

Чинник часу при цьому вважається лінійним, односпрямованим, що йде з минулого через «зараз» в яесь гіпотетично найближче або віддалене «майбутнє».

В архітектурному співтоваристві мало перебуває тих, хто б починав замислюватися над питанням, а чому в містобудуванні не все так, як треба з точки зору теорії?

А ті, хто над цим думає, він думає також виключно з позиції так званої «логіки здорового глузду», не помічаючи, що місто як якийсь незрозумілий багатьма організм живе зовсім за іншими принципами та правилами.

Ці принципи лежать на поверхні, але їх не оголошують як ключові. Їх або прагнуть не помічати, або «списують» на всілякі недосконалість в методах управління містом, на недопрацьованість законів, на професійні помилки як досвідчених, так і молодих проектувальників, на недосконалість проектних методик, на відсутність

необхідних теоретичних знань, і навіть на інші недоработки та лакуни.

Виправдовуючи, при цьому, необхідність «залізної логіки» причинно-наслідкових зв'язків між об'єктами і процесами в структурі міста.

Публікації наполягають на своєму «логічному» розумінні базових компонентів планувальної структури у генеральному плані міста: на своєму розумінні правил розміщення вуличної мережі, правил розміщення площ, правил організації житлової забудови, правил розміщення центрів та підцентрів громадського обслуговування населення, правил розміщення та формоутворення інших структурних частин міста.

Публікації наполягають на «логіці» наступності планувальних компонентів різних періодів історії міста; на «логіці» створення різних охоронних зон; на «логіці» створення містобудівних вузлів і зв'язків між ними, на «логіці» створення просторових доміант, на «логіці» побудови силуетів, панорам та глибинних композицій забудови, на «логіці» розвитку міста з урахуванням планувальної структури регіону загалом. А також наполягають на обліку багатьох інших «логік», кількість яких теж велика.

Проте ще в 70 і 80-х роках ХХ століття на національних і міжнародних з'їздах Союзів Архітекторів уже говорилося про те, що навіть при найкращому збігу обставин генеральні плани міст реалізуються лише на 20–30 %. Навіть не на 50 %! Нагадаємо: на той час генеральні плани міст розроблялися переважно на кожні 20 (іноді – 25) років. Після чого їх переробляли з огляду на всі обставини історії на нові 20 років. І так далі. Вже одна ця обставина насторожувала: «залізна логіка» прийнятої спільнотою теорії містобудування явно не спрацювала.

А те, що ніби відповідало теорії, насправді підкоряється правилам парадоксів.

Порівнюючи основні позиції теорії містобудування з змінами, що фізично спостерігаються в містах, неможливо не помітити очевидного: будь-яке місто з позиції теорії містобудування у ХХ – початку ХХІ століття перетворилося на свого

роду «театр містобудівних помилок»: там, де не можна будувати висотні житлові будинки, їх будують; там, де потрібно створювати громадські площі, їх не створюють, а наявні відкриті території швидко забудовують; там, де потрібно зберегти історичні будинки, їх зносять; там, де потрібно підкреслити забудовою форми рельєфу, їх закривають будинками-«ширмами»; там, де потрібно «звеличити» композиційну роль вершини міського пагорба, цю вершину забудовують будинками, які не виконують таку місію, вносячи плутанину у розуміння природного контексту міста; там, де будинками потрібно підкреслити важливі містобудівні осі, їх «затикають» будинками, форма яких взагалі не може використовуватися в цьому місці.

Таке поняття, як «природний каркас міста» з позиції теорії містобудування перетворився на явище, що майже не помічається.

В окремих містах десятками років існують не зайняті сучасними містобудівними комплексами території розміром 200–300–400 гектарів, розташовані в центральних ареалах! Сучасна теорія містобудування такого явища у мирний час просто не допускає. Але в житті вони є, і невідомо, коли будуть забудовані. За ними у різні роки проводились архітектурно-містобудівні конкурси. Але все залишається без змін.

При формуванні забудови взагалі не використовуються міжнародні правила поєднання будівель, що зводяться в різні історичні періоди. А про таке поняття як «архітектурно-містобудівний ансамбль» забули взагалі. Запитай зараз будь-якого архітектора – практика: як з позиції ансамбловості визначити метрично габарити та абриси, а також архітектоніку фасадів будівель навколо площі? Не дадуть відповіді. Не знають. Перевірено. А якщо хтось і розуміється на цьому, він повністю підкоряється можливості заробити і робить у проекті те, що не відповідає теорії містобудівних ансамблів.

У сучасних містах не змінюються відомі ще тисячі років, і закони використання архітектурного масштабу, ритму, метра,

пропорцій, які ніколи не втрачають свій зміст. Розмір та формоутворення будівель ніхто не перевіряє з позиції обліку особливостей навколишнього містобудівного простору. З усіх цих питань у проектній документації законом не передбачено необхідних схем.

Всі ці названі вимоги, а також містобудівні моменти, що залишилися за кадром, можна уподібнити таблиці множення: їй все одно, який зараз соціальний устрій і економіка, які зараз інженерні досягнення? Їй байдуже, який зараз клімат. Ці містобудівні правила просто завжди потрібно використовувати. Вони універсальні для світу, що сприймається з позиції матриці причинно-наслідкових зв'язків. Із позиції логіки.

Список втрати зв'язків міста з теорією містобудування настільки величезний, що для його оприлюднення потрібно підготувати спеціальну багатотомну монографію, присвячену містобудівним помилкам. А точніше – містобудівним парадоксам, які не вписуються в логіку здорового глузду. Саме парадоксів.

Швидкий розвиток інженерних та інших технологій у галузі архітектури та містобудування дійсно змушує по новому підходити до міста. Але, з іншого боку, саме цей феномен ще більше відсуває архітекторів – теоретиків та архітекторів – практиків від розуміння того, що зараз позначається терміном «місто».

Архітектори не встигають переосмислювати інновації, що швидко впроваджуються в життя, швидко змінюються у фізичному світі. У результаті так звана «логіка» «причинно-наслідкових зв'язків» у теорії містобудування перестає працювати. Виникає черговий парадокс: архітектори не знають, що творять.

Напрошується висновок: чи вірна з цього «дуального» погляду «дуальна» теорія містобудування? Якщо вона не працює на практиці в потрібному обсязі! Якщо вона існує більше як ідея, що спирається на причинно-наслідкові зв'язки в матеріальному світі. Чи правильно ми робимо, спираючись на ці так звані

причинно-наслідкові зв'язки в об'єктах містобудування?

Схоже, що настав час переглянути саму парадигму буття людини і світу, в якому вона живе. Парадигму, у складі якої нове, парадоксальне розуміння містобудування буде лише деяким окремим випадком чогось принципово іншого, невідомого. Іншим світом, іншим шляхом.

А якщо узагальнити все в більш ширшому сенсі, то можна стверджувати, що люди підійшли до меж можливостей загальноприйнятої матеріалістичної науки, яка теж покі ще «розвивається».

Вона починає не бачити те, що відбувається насправді за невідомими їй принципами і правилами [1-3; 7].

Сам Всесвіт, як зараз стверджують квантові фізики, парадоксальний, а не лінійний. Це означає, що і всі об'єкти «фізичного світу» теж треба розглядати тепер як парадоксальні.

**Мета дослідження** – розкрити сучасним архітекторам суть парадоксів у галузі містобудування. Парадоксів, що не підкоряються лінійній логіці.

Показати, як їх треба сприймати, які професійні висновки з них потрібно робити. Про що треба тепер, прямо тут і зараз, думати.

**Аналіз публікацій** на заявлену тему показав: ідею парадоксальності світу було відкрито тисячі років тому [9]. Вона пов'язана з парадигмою первинності свідомості та ілюзії матерії [2; 4; 8].

Навіть не вторинності, а просто ілюзії. Насправді з цього погляду вже тоді було постуліровано: матерії немає.

Цікаво відзначити: Альберт Ейнштейн, один із творців сучасної квантової фізики, яка доводить відсутність матерії, простору та часу, сказав: «Реальність – просто ілюзія, але дуже наполеглива».

Іншими словами, сучасною наукою показано, що парадигма первинності матерії та вторинності свідомості є хибною. У певному умовному сенсі людство знову повертається до суперечки Платона з Аристотелем у тому, що все-таки первинне: свідомість чи матерія [3]?



*Рис. 1. Репродукція фрагмента фрески Рафаеля Санті «Афінська школа» (Сікстинська капела, Рим). Леонардо да Вінчі у вигляді Платона, з діалогом «Тімей» у лівій руці, і Аристотель, тримаючи Никомахову етику. 1509–1511. Платон був об'єктивним ідеалістом. А Аристотель, його учень, – матеріалістом. Однак досягнення сучасної квантової фізики позбавили Аристотеля поняття «матерія». Її не існує. Протистояння ідеалізму та матеріалізму закінчилося у другій половині XX – на початку XXI століття у зв'язку із зникненням матерії*

Усе сказане означає одне: уявлення про об'єкти архітектури та містобудування вимагають тотального переосмислення як з погляду своєї суті, так і з погляду участі у житті людини.

Як втім переглянути розуміння і про саму людину. Потреба перегляду старих поглядів підтверджується квантовою нейробіологією, теорією взаємодії свідомості з псевдореальністю, психологією, групою теорій, що досліджують феноменальність світу, філософією свідомості, квантовою фізикою та іншими сучасними науками.

Таким чином, вивчення природи свідомості, її взаємозв'язку з так званою матерією, розумом і душею у сучасній науці стають найважливішим вектором сучасних знань [3; 8].

Однак тут виявилось не все так просто. Наприклад, провідні наукові теорії свідомості поки не прийшли до єдиного розуміння найважливішого питання: де ж

все-таки знаходиться ця сама свідомість? У мозку? За його межами, але у матеріальному світі? За межами матеріального світу? (Саме на третій варіант вказують давні філософські тексти Сходу).



*Рис. 2. Рафаель Санті. Афінська школа. Фреска в Станці делла Сеньятура («Залі указів») Ватиканського палацу. 1509–1511 роки. Визнана видатним художнім твором доби Відродження*

Щоб розібратися з локацією свідомості, а її бачать зараз по-різному, Великий міжнародний консорціум вчених організував безпрецедентний експеримент – свого роду «наукову дуель» між двома провідними теоріями свідомості: Теорією Інтегрованої Інформації (ІІТ) та Теорією Глобального Нейронного Робочого Простору (GNWT). Результати, опубліковані у престижному журналі Nature, виявилися несподіваними та кинули виклик обом теоріям. Як виявилось, програли обидві. Експеримент показав: уявлення вчених про свідомість поки що далекі від істини. Реальний механізм свідомості може бути набагато складнішим.

Можливо, він включає елементи обох теорій або навіть щось зовсім інше, чого ми поки не враховуємо. Принаймні так вважають прихильники класичної науки.

І ось із цього місця («з чогось поки що не відомого») подивимося на ситуацію докладніше. Оскільки саме вона тисячі років тому була описана у філософських трактатах Сходу та інших регіонів планети на різних континентах. Описано мислителями, яких у наші дні можна віднести до представників альтернативної науки. Вона також стикається і з неklasичною наукою, що

виникла в кінці XIX – 60-ті роки XX століття як реакція на кризу наукової раціональності.

Некласична наука включала теорію відносності Альберта Ейнштейна, принцип невизначеності Вернера Гейзенберга, теорію катастроф Рене Тома та інші інноваційні теорії.

Іншими словами, саме в цей час було зроблено наукові відкриття, які не вписувалися у прийняту тоді логічну картину світу. До революційних вчених некласичної науки належать Макс Планк, Ернст Резерфорд, Нільс Бор, Луї де Бройль, Вольфганг Паулі, Ервін Шредінгер, Вернер Гейзенберг, Альберт Ейнштейн. Вони довели, що матерії, простору та часу у нашому повсякденному розумінні не існує. Є їхня ілюзія. Насправді існують зовсім інші процеси та явища [1].

Виникли революційні теорії і щодо поняття «свідомість», а також щодо уявлень про те, з чим тоді вона взаємодіє, і що все це означає для нас.

Одна з таких сучасних теорій розглядає свідомість як потік, позбавлений простійного «я», яке безперервно змінюється.

Інша теорія показує, що весь Всесвіт має власну свідомість. Що він розумний?

Більше того, стверджується, що свідомість притаманна навіть найдрібнішим, фундаментальним часткам матерії. А також планетам та зіркам.

Сучасна квантова фізика стверджує, що свідомість складається з мікромасштабних подій квантової фізики, які породжують у людському мозку свідомі думки.

Один з провідних розумів фізики, лауреат Нобелівської премії 2020 року та піонер у дослідженні чорних дірок Роджер Пенроуз багато писав про квантову механіку як передбачуваного носія свідомості.

В 1989 він написав книгу під назвою «Новий розум короля», в якій стверджував, що «людська свідомість не є алгоритмічним, а є продуктом квантових ефектів».

Кляйнер і Талл слідуючи теорії Пенроуза, створили Інтегровану теорію інформації (ІТ). Відповідно до якої мікропроцеси людського мозку можна

використовувати для моделювання речей, що стосується всього Всесвіту.

Згідно з ІТ, свідомість присутня всюди, але накопичується лише там, де потрібно з'єднати разом різні пов'язані системи. Це означає, що людське тіло забите безліччю систем, які повинні взаємодіяти один з одним, тому там міститься багато свідомості, і його обсяги можна обчислити.

Революційна особливість теорії ІТ не пов'язана з людським мозком. Теорія стверджує, що свідомість зовсім не біологічна, а просто величина (теоретично ІТ свідомість вимірюється в «фі»), яку можна обчислити.

Іншими словами, тут свідомість вже виходить на межу матеріального світу, але не переступає її.

Таким чином, вищезазначений експеримент та інші роботи вчених продемонстрували важливий методологічний момент: необхідність розробки інших підходів до досліджень, що пов'язані зі свідомістю. Настільки інших, що це, мабуть, вийде за межі і альтернативної науки.

Все це означає одне: справді настав час переглянути всі наші уявлення про місто з позиції сучасних знань.

Перелічимо лише у першому наближенні, в дуже короткої і зовсім не повної формі, без занурення у механізми і деталі явищ, ключові теоретичні становища (парадокси) виходу на нове розуміння поглядів на місто як на ПАРАДОКС. Ось як вони тепер виглядають.

Місто не є продуктом людської думки.

Думки (включаючи мислеформи про місто) - спонтанне явище, що породжується Свідомістю, що спостерігає, що знаходиться за межами матеріального світу, а не в мозку людини. Думки не пов'язані з розумом людини. Розум їх лише вловлює, не розуміючи джерела (тобто не знаючи про існування «програміста» – Свідомості), і, будучи «лише» структурою, що працює на основі виконавчих програм, за допомогою яких описує прийняті думки, «сліпо» привласнює їх собі і переконує людину, в тому, що це він створив ідею про місто і

будь-яку його будівлю. А також про будь-який інший компонент генерального плану міста.

Справжнім «мислителем», у тому числі про місто, є Свідомість. Свідомість – Творець. У тому числі – міст. Але не матеріальних. А ілюзорно-матеріальних. Бо те, що люди бачать як матерію, насправді не існує. Це лише міф, вигаданий розумом. Розум – лише приймач частот. Він створений насамперед для виживання ілюзорної людини у вигляді роздумів, в основі яких прихована програма пошуку загроз, існуючих в ілюзії людського тіла і умовного зовнішнього простору, в якому існує людина.

У «механізмі» Свідомості немає первинного та вторинного. Немає причинно-наслідкових зв'язків. Немає ланцюжка «минуле – справжнє – майбутнє». Є лише «тут і зараз». Поняття «час» у Свідомості немає. Таким чином, справжнє «Я» людини знаходиться у Свідомості, яка розташована не в мозку людини, а за межами фізичного світу.

Ілюзорна людина, спираючись на своє дуальне мислення, від якого йому потрібно звільнитися, не повинна боротися з розумом. Він має стати на позицію його розуміння.

«Людина» має бути лише спостерігачем, тобто тим, хто усвідомлює думки, емоції та відчуття. Але не творить їх.

Він повинен бути лише безмовним свідком гри розуму, не залучаючись до неї безпосередньо. Тобто має стати спостерігачем думок, зберігаючи відстороненість та спокій. А не одягатися в маску їхнього «автора», «автора проекту міста», «автора проекту будівлі». Він ніколи не був і не може бути «архітектором» ілюзії. Проблема так званого «авторства» полягає в тому, що людський розум хоче все контролювати через присвоєння ідей. Народжуючи цим, гординю. Насправді контролю немає. У просторі спостереження і є справжнє «Я».

Думки – це лише шум фону. Мозок не наділений здатністю бути «зараз». І це проблема проблем. Він завжди думає ілюзорним «минулим» і не менш ілюзорним

«майбутнім». Хоча будь-яке місто з погляду Свідомості існує тільки «тут і зараз». Але не в минулому і не в майбутньому, яких ніколи не було і не буде.

Свідомість ніколи не народжувалась і ніколи не помре. Воно немає імені, не описується словами, немає виміру. Це порожнеча, наповнена не фізичним світлом, містить абсолютно все. Включаючи усі міста. Вони вже у ньому є. Більше того, Свідомість сповнена тиші. Ця тиша – щось більше ніж відсутність звуку. Це прохід у глибини самопізнання. Справжня тиша – цінний ресурс.

Порожнеча насправді не порожнеча, а простір усвідомленості всього у всьому. Внутрішній спостерігач і у глибинах Свідомості. Це безмовний свідок ілюзії матеріальності. Ілюзії думок. Справжня природа думок – ілюзорна. Є лише непохитна Свідомість. Зв'язок із ним дозволяє людині перетворитися.

Життя поза розуму – це не відмова від думок, а відмова від рамок. Це абсолютно нове, гармонійне життя. І в цьому – особливість людини, що злилася зі Свідомістю.

Місто слід розглядати з позиції відсутності влади розуму. Так званий розум людини не належить людині. Думки також не належать людині. Вони є ілюзія, є полон розуму, що створює присвоєнням його думок ефект «его». Спроби зупинити думки прирівнюються до спроб зловити свою тінь руками. Думки народжуються у тиші Свідомості. Примусіть людину не думати хоча б 20 хвилин. Не вийде.

Використовуючи спеціальні психологічні прийоми, співавтору цієї статті Воробйову В. В. ще на початку 90-х років ХХ століття довелося місяцями відпрацьовувати таку можливість.

І коли в мозку виникала, нарешті, тиша, при повній відсутності думок протягом 20–30 хвилин, простір навколо і внутрішні відчуття кардинально змінювалися.

Відкрилися інші світи, інші реальності, що існують у цьому ж самому місці. Але, що найголовніше, саме в стані Бездумності СВІДОМІСТЬ ПОЧАЛА ПРАЦЮВАТИ З

МОЗКОМ, ЗМІНЮЮЧИ ЙОГО ЗДІБНОСТІ, ПОЧАЛА ВВОДИТИ МОЗОК У РЕЗОНАНС З СОБОЮ. ЦЕ ТЕЖ ОПИСАТИ НЕМОЖЛИВО. Такий досвід можна зрозуміти лише через переживання та відчуття. Слів для того, що людина відчуває, немає.

Серед супутніх реакцій резонансу – особливі морфологічні види розгойдування, обертання, нахилів, стисків і розп'яття хребта. Особливі явища руху у просторі. А також активація внутрішнього екрана третього ока, на якому з'являються образи інформації, що йде зі Свідомості.

Думки, які постійно «влітають» у мозок людини, яка живе дуальним життям, не дозволяють створити місто як місце тиші. Людина, спираючись на бінарне мислення, у принципі не зможе уявити, що таке місто тиші. Не тієї, в якій всі фізичні звуки замовкають. А інший. ТИШІ СВІДОМОСТІ. Але саме таким він і має бути. Тому місто і наповнене різними звуками. А їх не повинно бути. Життя в місті має бути іншим. Люди дозволяють своїм думкам рости та керувати собою. Архітектор, малюючи генплан міста, повністю здається у полон думок. Насправді все має робитися не так.

Парадокс і в тому, що розум насправді можна зробити не ворогом, а союзником. Його, як у наведеному вище експерименті, можна навчити бути тихим. Думки просто є. Вони просто виникають у Пустоті Свідомості. А не в голові. І – все.

Одна з давніх теорій говорить приблизно про те ж, але іншими словами: Світ і місто в ньому – це пастка, помилка. Матеріальний світ у цієї теорії – лише тінь. Ілюзію матеріального світу створила Свідомість. Мозок же обдури вас. Він завжди вас обманює. Це підтверджено наукою. Він «домалював» «свою» теорію про те, чого ніколи не було і не могло бути. Тобто створив парадокс! І змусив вас повірити в цю теорію.

У сучасних уявленнях про людину і про життя в цілому теж не мало парадоксальних тверджень. Ось лише деякі з них.

Наприклад, згідно з однією з теорій якщо немає Спостерігача, то немає і Світу, а також

і людини і архітектури. Як тільки Спостерігач перестає спостерігати, світ зникає. Його нема. І Світ миттєво відтворюється, якщо знову Спостерігач активізується.

Широко відомий у квантовій фізиці досвід із двома щілинами (ефект Томаса Юнга, 1802 рік) і дозволив зрозуміти, що свідомість дійсно впливає на експеримент. В умовах спостереження електрон переходить зі стану розмазаної у просторі хвилі у стан локалізованої у конкретному місці частинки. У копенгагенській інтерпретації це називається «колапс хвильової функції». Незважаючи на переконливість експерименту, досі його не хочуть приймати послідовники класичної фізики. Більше того, вони «доводять» як би його не спроможність.

Сказати їм у відповідь можна лише одне: будь-яке нове явище в науці має пройти багато перевірок та випробувань, щоб бути остаточно визнаною теорією. Так завжди було і буде, якщо говорити системою понять, що базуються на лінійності та односпрямованості часу. Але без якогось початку нової теорії не буде і її продовження. Це стосується і теми цієї статті. Тема має прожити свій «випробувальний термін». Тому продовжуємо її розкриття у короткій формі, щоб почати орієнтувати фахівців на інше розуміння життя міста та людини. Щоб зародити в людях, відокремлених від Свідомості, інтерес по-новому поглянути на буття. Згадати свою надовго забуту природу.

Отже, акт спостереження змінює те, що спостерігається. Так звана «реальність» відгукується на наше усвідомлення. «Реальність» усвідомлює людину, відгукується на неї, подібно до дзеркала.

Спостерігач і спостережуване безперервно пов'язані один з одним. Питання лише в одному: як Спостерігач (Свідомість) спостерігає «місто»? У чому проявляється їхній зв'язок?

Місто існує як ілюзія лише завдяки нашому усвідомленню. «Реальність» міста – це якась присутність, що спостерігає, реагує та абстрагує.

Спостерігач та спостережуване утворюють ЄДНІСТЬ. Але розум заблокував

це розуміння, відокремив людину від Свідомості.

Логіка розуму не помічає погляд міста у відповідь на Спостерігача. Місто завжди знає про існування Спостерігача! І ВОНИ ЗАВЖДИ Є ЄДИНИМ! Логікою розуму цей момент не прийняти. Але він є. Місто підлаштовується під Спостерігача. А Спостерігач своїм спостереженням змінює місто. Це одна з парадоксальних схем, яка не може бути описана логікою.

І просто городяни, і архітектори в цьому контексті повинні сприйматися не як невідомі виконавці, а як спостерігачі, які не підозрюють своєї ролі в цій парадоксальній п'єсі, написаній Свідомістю.

При такому розумінні в окремих дослідників виникає якесь парадоксальне уявлення: «реальність» – це жива мисляча істота, що реагує на наші переживання і відображає їх у навколишньому світі.

Але що саме відображає ця реальність – питання, яке потребує вивчення. Серед парадоксів і таке: немає жодного зовнішнього, відокремленого від нас світу. Немає відокремленого від нас міста. Усі – усередині нас. Сама концепція дуальності як «Я+ зовнішнє середовище, зокрема місто» – це ілюзія. Лише концепція дуальності створює ефект зовнішнього, по відношенню до людини, міста.

Логіка розуму такі визначення не сприймає. Але розум не належить людині. Розум створений лише для роботи у бінарному режимі. У той час, як Свідомість працює в режимі відсутності дуальності.

Ніщо не існувало поза особистого сприйняття. Тобто все, що існує, існує виключно у межах Свідомості. СПРАВЖНІЙ РЕАЛЬНОСТІ ЛЮДИНА НІКОЛИ НЕ БАЧИЛА. І СПРАВЖНЬОГО СЕБЕ – ТЕЖ. ЛЮДИНА НЕ ЗНАЄ СЕБЕ З БУДЬ-ЯКИХ ПОЗИЦІЙ. НЕ ЗНАЄ, ТОМУ ЩО ВІН НЕ ІСНУЄ. Це ще один феномен, або парадокс, який логіка розуму не розуміє. Саме усвідомлення є єдиною незмінною величиною. УСВІДОМЛЕННЯ ЗАВЖДИ ПОСТІЙНЕ І НЕЗМІННО. Воно є свідком кожної миті, кожної мечти, кожного страху. Справжнє «Я» – не тіло, не думки.

Це – Усвідомлення, яке змінює уявлення про реальність. Реальність у тобі. Життя не відбувається у тобі. А тече через тебе. Руйнується система контролю, яку нав'язує розум зі своїм бінарним розумінням всього. Виникає почуття прямого загального взаємозв'язку. При цьому Центр Всесвіту – усередині людини.

Ще один парадокс: все створюється з нічого. Точніше: ніщо звідки не з'являється. Воно просто було і є завжди. Воно просто є. Усі відомі та невідомі міста світу просто є. Людина не може подивитися назовні, тому що все є її «Я». Усі міста – усередині «Я». І Творець таких міст – Свідомість. А не людина «розумна».

Людина не може подивитися на своє творіння зовні.

Подібні трактування справді алогічні. Відповіді питанням «хто я з себе» звичайною логікою неможливо. «Я є світло». І це безперервно.

Усвідомлення цього дозволяє вийти з матриці ілюзорного бінарного міста. Відповідно до цієї теорії потрібно сказати так: «Я – не тіло. Я в тілі, виявленому на Землі. Усередині мене є все. Я не перестаю бути всім. Бо я – у Єдності. Я – ДЖЕРЕЛО ВСЬОГО». Чоловік із бінарним мисленням на всі ці позиції покрутить пальцем біля скроні. Цього йому не зрозуміти.

Для мозку такі алогізми, м'яко кажучи, дивні. Логічне мислення у цій схемі не використовується. Мозок потрапляє у ситуацію, яку не здатний пояснити. Наука тут беспорядна саме з позиції причинно-наслідкових зв'язків.

Те, що люди називають фізичним світом, є лише вібрації.

Завдання архітектора (та й кожної людини загалом) розфокусуватися з фізичним світом і побачити, що він нестабільний.

На місці одного і того ж міста одночасно, тут і зараз, існує безліч інших міст, з іншою архітектурою, з іншими людьми. Розфокусування з фізичним світом деяким людям дає змогу побачити хоча б частину з них. При чому, миттєво.

За допомогою спеціальних тренінгів на цю тему в діапазоні 1986–1987 рр. одному з авторів цієї статті Воробйову В. В. вдалося спостерігати в одному місці, на базі відпочинку у лісі під Новомосковськом (тепер – Самаром) відразу 8 міст у різних частотних діапазонах. Спостереження велося звичайним зором. Умовно, це нагадує 8 калечних креслень, на кожній з яких лише одне місто. Або шарів у комп'ютерній програмі AutoCAD. Кожне місто було живе. З рухом всього. «Кальки» були ніби накладені один на одного. Однак Свідомість так влаштована, що зображення не змішувалися. Не заважали одне одному. Кожен бачився чітко, без перешкод. І все бачилося водночас.

Так зване фізичне тіло людини призначене для здобуття досвіду відчуттів. Мета життя з цього погляду – перетворити ці відчуття на ілюзію матерії. При цьому діє правило: все гаразд. Світ досконалий.

Тому ми тут не для вдосконалення світу. Не для вдосконалення нами придуманих міст. Усі дисертації з тих чи інших містобудівних удосконалень у контексті Свідомості не мають сенсу. У Свідомості все є тут і зараз. Причому все правильне. А не дуальне, тобто не досконале. Дуальне мислення, в алгоритмі якого розробляються дисертації, у принципі завжди дає лише помилкові теорії. Бо дуальне мислення не здатне генерувати правильні висновки. Тоді як теорії Свідомості досконалі. Тому Ми ж тут лише для відчуттів. А не для «вдосконалення Миру».

У Свідомості такого відчуття, як недостатність у природі немає. Адже дисертації і намагаються ліквідувати ту чи іншу недостатність. Яку жадає мозок. Але все є. І ВСЕ БЕЗ ПОЧАТКУ. Не треба нічого робити, досягати. Все вже є. Потрібно лише прийняти вібрацію дозволу. Первинна вібрація – «є». Дозволити собі бути цим «є».

Щоб виявити те чи інше місто, потрібно ввести себе в резонанс із відповідною вібрацією. А то й із кількома вібраціями. Виявляється все «є». Але для його сприйняття потрібно ототожнитися з дуальністю і ввійти в Єдність зі Свідомістю.

Це віддалено, на образному рівні, нагадує радіо або телевізор: одночасно існують різні частоти. Передачі на кожній частоті лише свої. Але перемикаючи канали, людина починає бачити лише один із них. І вібрує тільки на нього, на утримання світу у його передачі.

Можна сказати і так: потрібно не вибирати якийсь місто в дуальності, а побачити, що воно – це лише шаблон. Бо дуальний розум може налаштовуватись тільки на «міста-шаблони». А кожен шаблон – це так званий «досвід минулого». Однак «минулого» не існує. Але в «тут і в зараз» існує нескінченна кількість міст у Свідомості.

Таким чином, міста майбутнього створити неможливо за визначенням. Мозок у принципі сам нічого не вигадує. Але «минуле» – не в «минулому», а в «тут і зараз». Над «таким минулим» є справжнє місто. Точніше – нескінченна безліч міст. Потрібно вийти із шаблону та увійти в потрібне місто через свої вібрації.

Всі міста вже є, тут і зараз, як ЄДНІСТЬ СПОСТЕРЕЖУВАЧА, СПОСТЕРЕЖЕННЯ І СПОСТЕРЕЖЕНОГО. Усі «реальності» тут і зараз.

Кожен може сказати: назовні нічого немає. Це все «я». Дивлюсь усередину. Ці вібрації є моя реальність. Це реальність безумовного ухвалення. Вона просто «є».

З позиції Свідомості в основі всього кохання. Але не в тому розумінні, як це заведено в дуальному мисленні людей. З позиції Свідомості саме вібрації Любові і поєднують все в Єдність. Кохання, це відчуття зникнення частин і заміщення їх Єдністю. У цьому кожна частина світу має все. Тоді як у світі людей із дуальним мисленням є лише егоцентрична любов, що відокремлює людину від зовнішнього світу.

І що бореться з ним. А в парі закоханих – людина, що відокремлює від людини, оскільки їхні стосунки базуються на поділі функцій. З позиції Свідомості це взагалі не кохання.

Крокуючи вібраціями, людина створює так званий фізичний світ. Точніше – виявляє.

Бо вже все є. Важлива частота «є». І тоді егоцентризм та його шаблони зникнуть.

З позиції Свідомості всесвіти – всередині людини. У состві Мультивсесвіту. Кожну мить реальність наново перебирається тут і зараз. Кожну мить переносить людину в новий всесвіт, у нове місто. Всесвіти постійно прокидаються у людині. Більше того, людина, якщо можна використовувати терміни дуального мислення, забуває про те, в якому всесвіті вона була мить назад. І в якомусь місті. Йому здається, що він лишається там, де він і був.

І все тільки тому, що Свідомість є СПОСТЕРІГАЧ, який налаштував великі групи людей на однакові вібрації. Навіщо? Для самопізнання та самоусвідомлення. Якщо у дзеркалі ніхто не відбивається, то дзеркало не знає, що воно є

Людина подорожує частотами. Якщо він зможе перебувати в частоті «є», то виявляться такі прекрасні міста, про які жоден архітектор із дуальним мисленням не здатний додуматися. Бо вони з ЄДНОСТІ. Люди зможуть спостерігати їх БЕЗЗАПЕРЕЧНИМ ЗОРОМ.

Строго кажучи, життя у Свідомості, це ШЛЯХ БЕЗ ШЛЯХУ. Бо у свідомості вже все є. Плани досягнення чогось не потрібні. Цілі не потрібні. Нема чого прагнути. Потрібно жити відчуттями.

Вся архітектура міста при такому підході виявлятиметься за принципами Єдності Спостерігача та Спостережуваного. За такого підходу світ архітектурних та містобудівних форм міста не буде відокремлений від «Я». Дуальним мисленням це не зрозуміло. Але це можна прожити відчуттями.

При їх розділеності всім життям людини управляє дуальна особистість, або «єго», що складається з шаблонів «з досвіду минулого» і бажань мати щось, досягати чогось, підпорядковувати інших і панувати над ними в цьому ілюзорному світі. Показати себе найдосвідченішим, найзаслуженішим, найдостойнішим «орденів та медалей», «титулів і звань», посад та похвал. Тобто бути «самим – самим – самим»... Такі люди «тремтять» над «своїми» ідеями – щоб їх не

вкрали. Це я придумав, це моє. У цьому випадку ПРИВ'ЯЗКИ, що зупиняють розвиток, є. Але це суспільство підтримує законом про авторські права.

Однак, навіть класичними вченими доведено: одна і та ж ідея одномоментно, синхронно, спадає на думку відразу багатьом людям, котрі живуть у даному місті чи країні, а й у різних континетах. Це відбувається завдяки дії закону Руперта Шелдрейка (Велика Британія). Цей закон називають законом рожевих шпаків. Тобто законом морфічного резонансу чи теорією РОЗШИРЕНОГО РОЗУМУ.

Вчені цього напрямку досліджень стверджують, що морфічний резонанс пов'язані з пам'яттю у природі. (По суті йдеться про Свідомість, але Руперт Шелдрейк цей термін не використовує).

Вчені виявили: дуальні закони природи еволюціонують. Усе дуально розвивається. «Фхівці» думають, що еволюція насправді є більш творчим (парадоксальним) процесом, ніж ми думаємо. Вона не ґрунтується на логіці.

У кожного виду живих організмів є колективна пам'ять. І він нею користується. Згадайте політ восени зграй сворців перед відльотом на південь: як синхронно вони роблять у повітрі різні повороти. Тут прямий зв'язок із роботою Свідомості. Воно всім вклало однакові знання. Це ілюструється також наступним спостереженням. Одного разу на одній із вулиць Лондона на пляшки з молочною продукцією (молоком, кефіром та іншим), яка продавалася якоюсь жінкою, сів рожевий шпак. Дзьобою він сколупнув кришку з пляшки і став ласувати тим, що було у середині. І саме цієї миті безліч шпаків у різних країнах світу почали робити те саме! Це був експеримент, який потряс дослідників

Історіографія науки описує щось подібне і в світі дослідників: одні і ті ж закони та ідеї відкривають в ту саму мить відразу безліч людей у різних містах і країнах. Іноді навіть починаються суперечки: то хто ж «автор» відкритого наукового закону? Чиє ім'я потрібно надати цьому науковому закону? Одночасно про цей закон з'являються

публікації в різних країнах і навіть містах на території однієї країни.

Навіть у так званій не живій природі, наприклад, в об'єктах механіки, це правило діє теж під назвою «затягування частот».

У цьому контексті існує і такий вислів: «Все, що вигадали сучасні вчені, вже давно вигадали наші предки, причому, у кращому варіанті». «Це вже давно «вкрали» наші предки», - додають дотепники. Є ще один варіант фрази на цю ж тему: «Все, щоб не придумала людина, вже вигдав Всесвіт, і, до того ж, у багатьох варіантах»

З позиції Свідомості всі ці так звані авторські права – властивість розуму, що створив гординю. Всі ці речі при виході із дуальності йдуть, розчиняються. Бо вони взагалі не належать розумові людини.

Тому, так зване фізичне місто є «шлях у пекло», якщо слідувати образному, орієнтованому не на науку, а на церкву, висловлюванню Карла Юнга: «Щоб дорости до раю, спочатку коріння має зрости до пекла».



*Рис. 3. Триалектичність (вібраційна багаторівневість і багатоярусність, зведені умовно до триярусності світів) у «псевдопросторі», або, «просторовій ілюзії» міст, була представлена в містах як відображення проблеми входження (трансконвертації) в єдність внутрішнього світу людини, через якого досліджує себе Свідомість, із самим Свідомістю. Тоді про це знали всі архітектори. Тому ніколи не називали себе авторами проектів. Авторами була Свідомість. Воно виявляло міста у різних частотних діапазонах видимої стереометричним зором людей так званої реальності. Тобто не існуючої реальності неіснуючого світу. Архітектори лише налаштовували людей на потрібні вібрації за спеціальними методиками*

Власне, символічних зображень суті цього постулату в давніх культурах дуже багато. Одне з головних – образ «Дерева світу». Є й інші символи на цю тематику.

Вони говорять про те, що все видиме є незримим, що миттєво об'єднує всі нижчі, серединні та вищі світи.

Міста-ілюзії спочатку вже створювалися з обов'язковими «станціями всіх Світів» – у вигляді веж, геометрія яких призначалася за правилами резонансних (вібраційних) входження одних світів до інших.

Людині потрібно було разототожнитися з усіма рівнями розуму, чи «майї» (ілюзії), пов'язаними з континуумом існування. Тобто вийти з ілюзії відокремленого «я». Останнім щаблем виходу з майї у східних філософських системах вважається стан самадхи. На цій щаблі стане доступною НЕ ЗБАГНУТА НЕ ПОДВІЙНІСТЬ - звільнення від усіх прив'язок.

**ПЕРЕХІД ДО ЗЕМЛІ НОВОГО ТИПУ – ЦЕ ВІДХІД ВІД МАТЕРІАЛІЗМУ.**

Нагадаємо: термін «матеріалізм» запровадив Готфрід Вільгельм Лейбніц (XVII століття), відомий німецький філософ, математик, фізик, механік, історик. Форм матеріалізму кілька.

У книгах з історіографії науки говориться, що тоді серед учених склалася думка, що час життя матеріалізму «всього» 300–400 років. Потім він заміниться іншою парадигмою, що спирається на принципово інші погляди на світ і людину в ньому. Схоже, прогноз може справдитися.

У місті, виявленому Свідомістю через людину, сприйняття середовища зміниться кардинально. Все, що людина бачить стереометричним зором стане темнотою. Для всіх, хто не прокинувся, вона огорне планету назавжди. Настане вічна пільма. Жодні лампочки вечірнього освітлення ситуацію не змінять. Будь-який вид штучного світла людина перестане бачити. Однак, людина, що пробудила себе на Землі у вібраціях Свідомості, набуде безпорний (не дуальний, не прив'язувальний) зір, і побачить відразу все, але зовсім в інших якостях та формах. В інших вібраціях.

Беззаперечний зір термінами бінарного (стереометричного) зору не можна описати. Його можна лише відчувати. Логічне мислення втратить будь-який сенс через непотрібність.

Розум переналаштується на інші форми життя. Замість логіки буде щось інше.

Поняття «місто» доведеться радикально переосмислити. Навіщо в колишній моделі він потрібен взагалі? Оскільки знадобиться пройти ототожнення з формами. Світ перестане бути місцем страждання, порвавши з формою. Почнеться розуміння вищих форм буття.

Метафорично люди зараз подібні до лялечки, з якої скоро повинен вилупитися метелик.

Картина Поля Гогена, яка називається «Звідки ми прийшли? Хто ми? Куди ми йдемо?» говорить про те саме, але мовою образотворчого мистецтва.



Рис. 4. Поль Гоген. «Звідки ми прийшли? Хто ми? Куди ми йдемо?»

Це велика символічна картина, написана в 1897–1898 роках на Таїті. Зараз вона знаходиться у Музеї образотворчих мистецтв у Бостоні, США.

Він вважається європейським художником, французом, але все життя його було втечею від європейської цивілізації. Схоже, він усвідомив безвихідь моделі європейського буття і буття людства в цілому. І оселився на острові Таїті з метою подальших роздумів про певний умовний «рай», який їм розумівся аж ніяк не в західноєвропейському філософсько-релігійному варіанті, а більше в варіанті східних навчань про самадхі, а також вчення гностиків про необхідність руху людини назад, у Плерому. Поль Гоген вважав людську цивілізацію хворобою планети. Пізніше приблизно в такому ж контексті, але за своїм висловився видатний учений ХХ століття Стівен Хоккінг (1942–2018), британський фізик-теоретик, космолог і астрофізик сказав, який сказав: «Людство – це лише бруд на середніх розмірів планети». Зрозуміло, він мав на увазі егоцентричність

людства, що живе за принципами дуального мислення. У людині має виникнути щира готовність досліджувати все з позиції Свідомості. Тобто ПОДИВИТИСЯ НА СЕБЕ З СТОРОНИ. Як палігрим Данте, що опинився в темному лісі, збившись з Шляху і ВИЗНАВ, ЩО ЗАГУБИВСЯ.

У ведичних філософських трактатах Індії подібні процеси трактуються також по своєму: буття утворене Шивою та Шакті. Архетипом жіночого початку, що виявляє інволюцію духу у світ фізичних форм, служить Шакті.

Шива – вихідний потік, потік визволення, виходу в ЧИСТУ СВДОМІСТЬ, В ЕВОЛЮЦІЮ ЗА МЕЖАМИ СВІТУ ФОРМ, В ТРАНСЦЕНДЕНТНІСТЬ. Тобто в ту саму Свідомість, про яку говориться вище.

У світі двоїстості саме ці два потоки і представляють ШЛЯХ БЕЗ ШЛЯХУ. Тобто ПОТІК РОБЛЕННЯ І НЕ РОБЛЕННЯ У ЧАСОВОМУ І ПОЗАЧАСОВОМУ. Коли ці два виміри вступають у союз, вони сприймаються як один. Це і є САМАДХІ.

Людина в цьому випадку почне чути ту саму МУЗИКУ ВИЩИХ СФЕР, МУЗИКУ ІСНУВАННЯ ВСЕСВІТУ, про що написано багато трактатів у «минулому». Музику поза розуму. Співавтору цієї статті Воробйову В. В. колись пощастило випробувати це СЛУХАННЯ.

Сталося це спонтанно після чергової роботи з біополями людей. Музика «полилася зверху» (це порівняння умовне, оскільки адекватних слів для того, що тоді довелося пережити не існує. Це було інше відчуття просторових координат, не описуваних математикою; точніше – там не було простору). Жоден відомий музичний інструмент світу звичайних людей подібних мелодій не зможе відтворити. Незвичайним виявилось й те, що ці звуки були настільки урочистими, що одразу викликали появу мурашок на шкірі.

Вони вводили у стан екстазу та катарсису одночасно. Ефект виявився настільки несподіваним і сильним, що виникло переживання про те, хто ми є за межами імені і за межами своєї форми. Відпустивши все, чим ми не є, виникло щось,

з чим раніше стикатися не доводилося. Це і був дотик САМАДХИ – ПРИПИНЕННЯ ДІЯЛЬНОСТІ.

Усі техніки самовдосконалення були тепер у минулому. Потрібно було відкинути ДІЯЧА І ДІЯЛЬНІСТЬ. Це був пошук того, хто шукає, щоб зустрітися з БЕЗУМОВНИМ СПРАВЖНИМ. Почалося відмирання шаблонів, які керують життям людини.

Повернутися «в зараз» означає відмовитися від переваг обумовленого розуму. Це спопеління полярного стану розуму. Тобто не реагувати на те, що з'являється всередині поля змін.

Будучи тут і зараз, ми розв'язуємо всі вузли «причинних зв'язків». Другий початок термодинаміки перестає діяти.

Створення міста дуальним розумом подібно хвилям на поверхні моря. Кожна хвиля затихає, змінюється новою. Тоді як у глибинах моря – «тиша і спокій». Хоча насправді в цій тиші теж існують різні процеси та явища.

Існують такі не фізичні свічення, яких на поверхні морю не буває. Але побачити їх, пізнати їх можна лише опустившись сюди, наприклад, на підводному апараті.

Ці роботи на дні Чорного моря виконувались у режимі використання Воробйовим В. В. та двома його напарниками, Гавришем Н. М. та Орловським С. П., змінених станів свідомості. Замовниками робіт були бізнес-структури та військово підприємство. Вони й оплачували роботи, на які було витрачено кілька місяців у 1994, 1995 та 2004 роках. Без входження у змінні стани свідомості завдання, поставлені перед виконавцями, вирішити було неможливо у принципі. Саме в режимах зміни стану свідомості, в режимах роботи зі СВІДОМІСТЮ за межами матеріального світу, все було виконано. Методика виправдала себе.

У наступні роки методика адаптувалася під завдання роботи з містобудівними об'єктами.

Тут доречно згадати мудру фразу Сократа: «Я знаю, що я нічого не знаю». Потрібно увійти до прийняття розумом того, що він нічого не знає. Тобто опинитися у

брамі самадхи: бути спокійним без надії, без думки.



*Рис. 5. Воробйов В. В. та Аврашов І. Д. (капітан підводного апарату «Лангуст»). Крим. 2004 рік. Період чергових підводних робіт на дні Чорного моря з використанням ЄДНОСТІ ЗІ СВІДОМІСТЮ*

Томас Еліот у цьому контексті якось написав: «Тихіше, сказав я душі. Чекай без надії. Бо надія народжена обумовленим розумом. Чекай без думки. Адже ти не дозріла для думки».

Маленьке «я» кожної людини, що мислить дуально, є продукт розуму, створений на основі програм незавершеного досвіду минулого. Тому таким людям постійно хочеться вдосконалювати міста, розвивати їх... Але ж міста вже досконалі, в іншому «Я», у Свідомості.

Тому ШЛЯХ У СЕРЕДИНУ – ЦЕ ШЛЯХ НАЗОВНІ. При прояві міст зі СВІДОМІСТІ потрібно відпустити все, що ми знаємо. Потрібно **добитися стану чхани – присутності тут і зараз, без втручання образів розуму, його ідей та концепцій.**

Якщо Усвідомлення присутнє тотально, то немає жодного знання навіть у несвідомому. Тоді немає більше спостереження і спостережуваного. Немає більше стосунків між людиною та містом як об'єктом. Це пробудження означає не відкидання розуму, а дозволу йому бути таким, яким він є, не потрапляючи в його пастку. Потрібно перебувати в свідомості свідомо. ТИША – НАЙВЕЛИЧНЕ ВЧЕННЯ СВІДОМІСТІ.

Наступне прекрасне вчення – вчення про чисту Свідомість. АБСОЛЮТНУ СВІДОМІСТЬ. Про це Платон сказав колись так: «ЄДИНЕ ПЕРЕВЕРШУЄ ВСІ ІСТОТИ, АЛЕ НЕЗМІННО ПРИСУТНЄ У НИХ».

Істина існує одночасно з любов'ю. При цьому парадокс розуміння міста в тому, що його **ФОРМА Є ПОРОЖНЕЧА, А ПОРОЖНЕЧА Є ФОРМА.** Тут є **ПРИСУТНІСТЬ БЕЗ ВИБИРАННЯ, А ЗНАЧИТЬ – БЕЗ ВИБИРАЮЧОГО.**

Пізнання міста самадхи розумом не зробити. Обмежений розум для цього не прокидається. Він не може пізнати нерухомість. Бо розум – це рух. А рух створює час та простір міста. Розум створює нескінченний процес роблення **ДРОБЛЕННЯ!**

**ШЛЯХ БЕЗ ШЛЯХУ** – це самадхи, це зникнення між діянням та буттям. Поділ – це діяльність розуму. Розум не може пізнати початкову свідомість.

Шлях без шляху – це стан зникнення ілюзії розділеності. Правда в тому, що ми ніколи не були поділені.

Місто потрібно сприймати як нерухомість, як **ПОРОЖНЕЧУ** (з відсутністю двоїстості) на поверхні Землі, що обертається навколо осі. Яка всередині людини-ілюзії.

Як виявити нерухоме місто, яке не існує? Як воно буде пов'язане з людиною, яка теж не існує? Це те, що треба відчувати. Відповіді – не у теоріях, а у відчуттях. Є лише Свідомість. Яка пізнає себе через створення ілюзії людини.

Немає початку та продовження. Все відбувається ніколи не розпочавшись і ніколи не закінчуючись. У Свідомості відбувається розпад того, що чекає. Чекати місто нема кому. Відбувається розпад «я-его», розпад спостерігача, розпад усвідомлюючого, розпад знаючого, розпад розрізняючого.

Усвідомлення завжди є, воно нікуди не зникає, і воно безперервне. Треба розвернутися до себе. Без усвідомлення міста немає сприйняття міста. **УСВІДОМЛЕННЯ НІКОЛИ НЕ ЗМІНЮЄТЬСЯ.**

### **Висновки**

Місто як парадокс має розумітися як ілюзія, створена Свідомістю, розташованою поза межами матеріального світу.

Свідомістю, що не має ні початку ні кінця, ніколи не народжується і не вмирає, містить у собі ніщо (порожнечу), в якій є все, досконало і в достатку.

Розум людини не має до цього відношення, але прагне все привласнити собі і нав'язати людині, що це вона все створила. У місті – парадоксі людина повинен звільнитися від впливу розуму та жити за принципом: що роблю, те й хочу. А не за принципом, що хочу, те й роблю.

Те, що ми бачимо – це лише відображення того, як розум інтерпретує ілюзію. Світ людини у місті – це лише проекція його сприйняття у дуальності. Людина не бачить світ таким, яким він є. Так званий фізичний світ лише продукт Свідомості.

Чиста свідомість є справжня природа людини. Що б не відбувалося у місті та за його межами, за всім стоїть Спостерігач – Свідомість. Воно завжди незмінне, вічне і нескінченне. Воно завжди – **БЕЗПРИЧИННА ПРИЧИНА У ПРИЧИНІ БЕЗ ПРИЧИН.**

Людина, як споживач міста, з цієї точки зору теж має розглядатися як об'єкт – ілюзія, через який Свідомість досліджує себе. Місто знаходиться не у зовнішньому, по відношенню до людини світі, а у його внутрішньому світі. Людина при цьому просто ідея Свідомості.

Свідомість є справжнє «Я» людини, яка не має форми та імені. Все, що докола людини, це її внутрішній світ. Світ – майя, ілюзія, створена Свідомістю. Свідомість – центральний елемент всього.

Людина та місто існують тільки завдяки тому вони є об'єктами спостереження для Спостерігача – Свідомості.

І місто та людина як парадокси існують тільки тут і зараз. Вони При цьому особистості немає, а все пізнається лише через насолоду. Коли людина занурюється в сьогодення, вона занурюється у спокій.

Ілюзія зникає, коли зникає межа між суб'єктом та об'єктом. Нема спільної реальності. Людина може у своїй зазначити таке.

*«Я є все». «Я - джерело всього»; «Немає нічого, крім мене». «Моя цінність – не*

виробляти, а насолоджуватися життям». «Я» в Свідомості ніколи не народжувалося і ніколи не помре». «Немає джерел у зовнішньому світі». «У новому світі дуальності нема. Тут усе гаразд». «Ми живемо тільки тут і зараз». «Життя існує тільки зараз». «Мені вчитися нема чого, все вже є». «Пізнавати себе – моя діяльність». «Потрібно просто жити». «Свідомість – Творець втілює через це тіло. Йому це цікаво». «Фокус перегляду завжди спрямований усередину». «Я є. Фокус у мені. Хочу і виявляю будь-яке місто, яких нескінченне число в тому самому місці. Але – вибір уже зроблено. При цьому все абсолютно». «Потрібно усвідомлено жити в моменті». «Цей світ – не фізичний. Це ілюзія. До того ж – нестабільна. Тут усе, що потрібно, вже є. Це мозок виводить нас із справжнього розуміння себе та світу. Тому світ, який видається фізичним, насправді є феноменальним». «Завдання людини – РОЗІЗНАТИ І ПІЗНАТИ ІЛЮЗІЮ. ПІЗНАТИ ЦІЛІСНІСТЬ. І ЖИТИ У ЦІЛІСНОСТІ. Але життя – це лише своєрідна кінопроекція на екрані Свідомості. СВІДОМІСТЬ Є ПОРОЖНЕЧА. Все проявляється у порожнечі. Сама структура будь-якої структури порожня. А людина при цьому – глядач. Він не може увійти у фільм на екрані та змінити його сценарій. А також стати його учасником. Він лише глядач. Свідомість створює себе через поділ, бо не побачити Єдності, якщо немає поділу».

«Через Кохання йде поєднання в цілісність, усвідомлення цілісності чи ЄДНОСТІ». «Сенс цієї гри – усвідомлювати себе через відчуття». «Я – Свідомість, а не людина. Я – Свідок Ігри. Гра йде у моєму усвідомленні». «Спостерігач створює те, що спостерігається. Я своїм доглядом створюю момент, у якому все вже є. Включно з містом як парадокс. Свідомість створює себе іграми». «Я – завжди дзеркало». «Все, що говорить, виникає і розчиняється в дзеркалі». «Все є і нічого немає». «Все, що перед моїм поглядом з'являється, виникає з мене. При цьому кожен момент створюється заново. Але я не є цим». «Світ створюється чудовим чином». «Я не у світі, я не в житті. Але я є життя. Все вже є у мені». «Я – до всіх ідей та об'єктів. Я те, у чому це виникає. Я той, хто дозволив цьому бути».

«Все робиться саме, безсильно. Робителя немає». «Існування людини – лише сон Свідомості». «Я завжди був тим, ким ніколи не народжувався і ніколи не вмирав».

Таким чином, місто є феномен, є парадокс - і його мешканець, людина, це явище, що виходить за рамки дуальної логіки. Це те, що з позиції розуму не може мати розуміння та пояснення. Це не може мати пояснення з позиції класичної науки, що базується на дуальній логіці. Це те, що дуальний розум не захоче визнати. Але це те, що не потребуватиме розуму. І це те, що чекає людство в «майбутньому», якого у Свідомості немає.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаменко А. А. Развитие человеческого общества в XXI столетии. *К основам физического взаимодействия*. Днепропетровск, 2010. Т. 1. С. 54–73.
2. Акимов А. Е., Шипов Г. И. Сознание, физика торсионных полей и торсионные технологии. *Сознание и физическая реальность*. 1996. Т. 1, № 1–2. С. 34–56.
3. Антоненко Н. В. Периодическая система заков психики человека в системе Всеобщих Законов Мира и Общих законов человеческого общества : дис. докт. психол. наук. Москва, 2007. 44 с.
4. Бугаев А. Ф. Эниология человека. 2-е изд., испр. и доп. 2006. 320 с.
5. Воробьев В. В., Шило О. С. Пространственные рефлексии человека как отражения эниологической структуры среды. *25 лет познания пространственно-волновой субстанции мировоззренческих представлений : XI Междунар. науч.-практ. конф.* (08–09 ноября 2019 г.). Днепро, 2019. С. 83–95.
6. Воробьев В. В. Город как эниокомплекс. Эниология. Одесса, 2001. С. 2–8.
7. К основам физического взаимодействия. *От атома к двуядерно-физическим субстанциям и живым волнам : матер. VIII междунар. науч.-практ. конф. междунар. академии биоэнерготехнологий* (04–06 октября 2013 г.). Научные труды действительных членов и членов-корреспондентов. Под науч. ред. проф. В. А. Ткаченко. Днепропетровск, 2013. 518 с.

8. Окорокс В. Б. Метафизика эпохи трансцендентального мышления : специфика, сущность и тенденции развития. Днепропетровск : ДНУ, 2000. 270 с.

9. Современное миропонимание : духовные аспекты развития культуры XXI столетия : матер. науч.-практ. конф. Днепропетровск : Литограф, 2012. 54 с.

## REFERENCES

1. Adamenko A.A. *Razvitie chelovecheskogo obshchestva v XXI stoletii* [Development of Human Society in the 21st Century]. *K osnovam fizicheskogo vzaimodeistviia* [On the Fundamentals of Physical Interaction]. Dnipropetrovsk, 2010, vol. 1, pp. 54–73. (in Russian).

2. Akimov A.E. and Shipov G.I. *Soznanie, fizika torsionnykh polei i torsionnye tekhnologii* [Consciousness, the Physics of Torsion Fields, and Torsion Technologies]. *Soznanie i fizicheskaiia real'nost'* [Consciousness and Physical Reality]. 1996, vol. 1, nos. 1–2, pp. 34–56. (in Russian).

3. Antonenko N.V. *Periodicheskaia sistema zakonov psikhiki cheloveka v sisteme Vseobshchikh Zakonov Mira i Obshchikh zakonov chelovecheskogo obshchestva : dis. dokt. psikhol. nauk* [The Periodic System of Human Psyche Laws within the Universal Laws of the World and Human Society : Doctoral Dissertation in Psychology]. Moscow, 2007, 44 p. (in Russian).

4. Bugaev A.F. *Eniologiia cheloveka* [Human Eniology]. 2nd ed., rev. and ext. 2006, 320 p. (in Russian).

5. Vorobiov V.V. and Shylo O.S. *Prostranstvennye refleksii cheloveka kak otrazheny eniologicheskoi struktury sredy* [Human spatial reflections as a reflection of the enological structure of the environment]. *25 let poznaniia prostranstvenno-volnvoi substantsii mirovozzrencheskikh predstavlenii : XI Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaia konferentsiia* [25 Years of Understanding the Spatial-Wave Substance of Worldview Representations : XI International Scientific-Practical Conference]. 08–09 November, Dnipro, 2019, pp. 83–95. (in Russian).

6. Vorobiov V.V. *Gorod kak eniokompleks. Eniologiya* [The City as an Eniocomplex. Eniologiia]. Odesa, 2001, pp. 2–8. (in Russian).

7. *K osnovam fizicheskogo vzaimodeistviia* [Toward the Fundamentals of Physical Interaction]. *Ot atoma k dvuiderno-fizicheskim substantsiiam i zhivym volnam : materialy VIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Mezhdunarodnoi akademii bioenergotekhnologii* [From Atom to Dual-Nucleus Physical Substances and Living Waves : Proceedings of the 8th International Scientific-Practical Conference of the International Academy of Bioenergetic Technologies]. October 4–6, 2013, ed. by Prof. V.A. Tkachenko. Dnipro, 2013, 518 p. (in Russian).

8. Okoroks V.B. *Metafizika epokhi transzental'nogo myshleniia : spetsifika, sushchnost' i tendentsii razvitiia* [Metaphysics of the Era of Transcendental Thinking : Specifics, Essence, and Development Trends]. Dnipro : DNU Publ., 2000, 270 p. (in Russian).

9. *Sovremennoe miroponimanie : dukhovnye aspekty razvitiia kultury XXI stoletii* [Contemporary Worldview : Spiritual Aspects of Cultural Development in the 21st Century]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the Scientific-Practical Conference]. Dnipropetrovsk : Litograf Publ., 2012, 54 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 21.03.2026.

Прийнято після рецензування: 03.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 624.15:624.042.7

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.62.1243

## ДВОВИМІРНІ БЕТОННО-ГУМОВІ ПЕРІОДИЧНІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ ВІД ВІБРАЦІЙ ТА СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

ДАНІШЕВСЬКИЙ В. В.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
КУЧИН І. О.<sup>2</sup>, *асп.*

<sup>1\*</sup> Кафедра будівельної механіки та металевих конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-13, e-mail: [vladyslav.danishevskyy@gmail.com](mailto:vladyslav.danishevskyy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3049-4721>

<sup>2</sup> Кафедра будівельної механіки та металевих конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (063) 691-48-11, e-mail: [illiakuchyn@gmail.com](mailto:illiakuchyn@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-6627-6315>

**Анотація.** У статті розглянуто проблему захисту будівель і споруд від вібраційних та сейсмічних впливів за допомогою періодичних бетонно-гумових структур, здатних формувати заборонені зони для пружних хвиль у заданих частотних діапазонах. Актуальність дослідження зумовлена потребою створення фундаментних систем, які забезпечують ефективне послаблення динамічних навантажень без істотного ускладнення конструктивної схеми та можуть бути використані в інженерній практиці для задач віброзахисту й сейсмоізоляції. Досліджено дві двовимірні бетонно-гумові періодичні конструкції: двошарову та тришарову з важким внутрішнім ядром. Чисельне моделювання виконано методом скінченних елементів у межах плоскої задачі теорії пружності з використанням умов періодичності Флоке-Блоха. Для обох конфігурацій визначено межі першої повної забороненої зони та простежено їх зміну залежно від площової частки включення. Показано, що збільшення частки включення приводить до зниження нижньої межі забороненої зони, однак одночасно супроводжується зменшенням її ширини. Установлено, що двошарова конструкція формує ширшу заборонену зону, тоді як тришарова конфігурація забезпечує зміщення робочого частотного діапазону в нижчу область. Отримані результати підтверджують перспективність двовимірних бетонно-гумових періодичних конструкцій для задач віброзахисту та сейсмоізоляції фундаментних систем. **Мета статті** полягає у чисельному дослідженні та порівняльному аналізі двошарової і тришарової двовимірних бетонно-гумових періодичних конструкцій з метою встановлення впливу їхньої геометрії на положення та ширину першої повної забороненої зони, а також у визначенні конфігурацій, найбільш перспективних для задач віброзахисту та сейсмоізоляції будівель. **Висновок.** Проведене дослідження показало, що двошарова і тришарова бетонно-гумові періодичні конструкції реалізують різні механізми формування ефективного робочого діапазону: двошарова конфігурація є доцільнішою у випадках, коли пріоритетом є ширина забороненої зони, тоді як тришарова – коли необхідно знизити нижню межу частотного відсікання. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого проектування періодичних віброзахисних і сейсмоізоляційних фундаментних систем.

**Ключові слова:** *періодичні структури; бетонно-гумові конструкції; заборонена зона; віброзахист; сейсмоізоляція; метод скінченних елементів; умови Флоке-Блоха*

## TWO-DIMENSIONAL CONCRETE-RUBBER PERIODIC STRUCTURES FOR THE PROTECTION OF BUILDINGS AGAINST VIBRATION AND SEISMIC LOADS

DANISHEVSKYY V.V. <sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
KUCHYN I.O.<sup>2</sup>, *Postgrad. Stud.*

<sup>1\*</sup> Department of Structural Mechanics and Metal Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-13, e-mail: [vladyslav.danishevskyy@gmail.com](mailto:vladyslav.danishevskyy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3049-4721>

<sup>2</sup> Department of Structural Mechanics and Metal Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (063) 691-48-11, e-mail: [illiakuchyn@gmail.com](mailto:illiakuchyn@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-6627-6315>

**Abstract.** The article addresses the problem of protecting buildings and structures from vibration and seismic impacts by means of periodic concrete-rubber systems capable of forming band gaps for elastic waves within prescribed frequency ranges. The relevance of the study is associated with the need to develop foundation systems that can effectively attenuate dynamic loads without significant structural complication and can be applied in engineering practice for vibration mitigation and seismic isolation. Two types of two-dimensional concrete-rubber periodic structures are investigated: a two-layer structure and a three-layer structure with a heavy internal core. Numerical modeling is performed using the finite element method within a plane elasticity formulation with Floquet-Bloch periodic conditions. For both configurations, the boundaries of the first complete band gap are determined and their variation with the areal inclusion fraction is analyzed. It is shown that increasing the inclusion fraction leads to a reduction in the lower band-gap boundary, but at the same time results in a decrease in the band-gap width. It is established that the two-layer structure provides a wider band gap, whereas the three-layer configuration shifts the operating frequency range to lower values. The obtained results confirm the potential of two-dimensional concrete-rubber periodic structures for vibration protection and seismic isolation of foundation systems. *The purpose of the article* is to carry out a numerical study and comparative analysis of two-layer and three-layer two-dimensional concrete-rubber periodic structures in order to determine the influence of their geometry on the position and width of the first complete band gap, as well as to identify the configurations that are most promising for vibration protection and seismic isolation of buildings. **Conclusion.** The conducted study has shown that two-layer and three-layer concrete-rubber periodic structures realize different mechanisms of forming an effective operating frequency range: the two-layer configuration is more appropriate when the priority is the width of the band gap, whereas the three-layer one is preferable when it is necessary to decrease the lower cut-off frequency. The obtained results may serve as a basis for the further design of periodic vibration-protective and seismic isolation foundation systems.

**Keywords:** *periodic structures; concrete-rubber structures; band gap; vibration protection; seismic isolation; finite element method; Floquet-Bloch conditions*

**Вступ.** Підвищення ефективності систем віброзахисту та сейсмоізоляції будівель залишається актуальною задачею будівельної механіки. Класичні рішення, зокрема гумометалеві опори та інші традиційні ізолятори, добре працюють у певних діапазонах навантаження, однак не завжди дозволяють цілеспрямовано керувати передаванням хвильової енергії в заданих частотних інтервалах [1]. У зв'язку з цим упродовж останніх років активно розвивається підхід, заснований на використанні періодичних матеріалів і метаматеріалів у фундаментних системах [2–5].

Для періодичних структур характерною є поява заборонених зон – частотних інтервалів, у межах яких поширення пружних хвиль різко послаблюється або практично блокується. Цю ідею вже застосовували до шаруватих періодичних фундаментів, локально-резонансних систем і експериментальних зразків для віброзахисту та сейсмічної ізоляції [2; 3; 6; 7]. Разом із тим для інженерної практики важливим залишається питання про те, як саме геометрія комірки періодичності двовимірної неоднорідної конструкції впливає на положення першої забороненої зони та її ширину.

У цій роботі розглянуто дві двовимірні бетонно-гумові періодичні конструкції: двошарову, що складається з бетонної матриці та гумового включення, і тришарову, у якій до гумового шару додано важке внутрішнє ядро. Такий вибір дозволяє не лише оцінити вплив площевої частки включення, а й порівняти дві архітектури, орієнтовані на різні інженерні цілі: формування ширшої забороненої зони або зміщення робочого частотного діапазону в нижчу область. Окремо слід підкреслити, що сучасні дослідження з параметричної оптимізації бетонно-гумових періодичних фундаментів підтверджують важливість саме геометричних факторів у керуванні частотним спектром [8; 9].

**Постановка задачі та чисельна модель.** Об'єктом дослідження є двовимірний неоднорідний періодичний фундаментного типу в межах плоскої задачі теорії пружності. Для її опису використано елементарну комірку періодичності, що дозволяє звести нескінченну періодичну систему до однієї характерної області розрахунку на основі умов періодичності Флоке-Блоха. Чисельне моделювання виконано методом скінченних елементів у програмному середовищі COMSOL Multiphysics, а спектральний аналіз

проведено в межах першої зони Бріллоуена [5; 7].

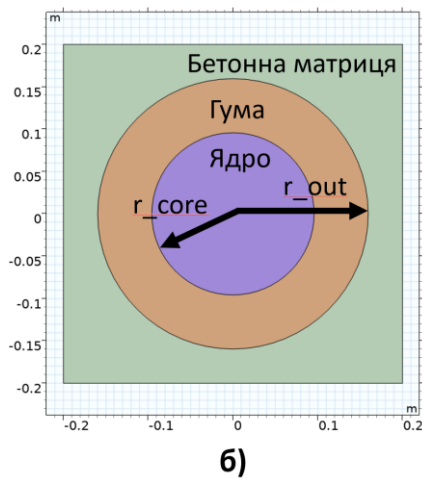
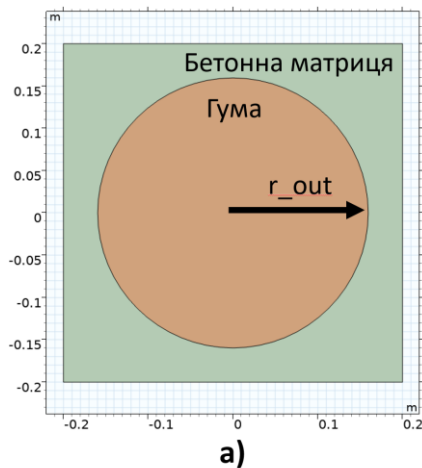


Рис. 1. Комірки періодичності двошарової (а) та тришарової (б) двовимірних неоднорідних бетонно-гумових конструкцій

У двошаровій конструкції геометрія комірки періодичності задається стороною бетонної матриці  $a_{total}$  і радіусом гумового включення  $r_{out}$ . У тришаровій конструкції додатково вводиться радіус внутрішнього ядра  $r_{core}$ . Керуючим параметром є площа частка включення, яка визначається співвідношенням  $f_{area} = \pi \cdot r_{out}^2 / a_{total}^2$ . Для тришарової моделі співвідношення між радіусом ядра і товщиною гумового кільця задається безрозмірним параметром  $\beta = r_{core} / (r_{out} - r_{core}) = 1.5$ . Такий підхід дозволяє порівнювати конструкції в єдиній параметричній постановці без зайвого розширення простору змінних [7; 8].

У розрахунках використовувалися такі фізико-механічні характеристики матеріалів: для бетону – густина  $2\ 300\ \text{кг/м}^3$ , модуль

Юнга  $3.14 \times 10^{10}\ \text{Па}$  та коефіцієнт Пуассона  $0.33$ ; для гуми – густина  $1\ 300\ \text{кг/м}^3$ , модуль Юнга  $1.4 \times 10^5\ \text{Па}$  та коефіцієнт Пуассона  $0.463$ ; для важкого внутрішнього ядра – густина  $7\ 850\ \text{кг/м}^3$ , модуль Юнга  $2.05 \times 10^{11}\ \text{Па}$  та коефіцієнт Пуассона  $0.28$ . Базовий розмір комірки періодичності прийнято  $a_{total} = 0.4\ \text{м}$ .

Для кожного значення  $f_{area}$  обчислювалися власні частоти, після чого визначалися нижня межа, верхня межа та ширина першої повної забороненої зони. У подальшому аналізі основну увагу приділено порівнянню двох конфігурацій за цими трьома характеристиками. Такий вибір дозволяє перейти від формального опису дисперсійного спектра до практично значущих показників, які безпосередньо пов'язані з можливістю використання періодичних фундаментів у задачах віброзахисту та сейсмоізоляції [3; 6; 10].

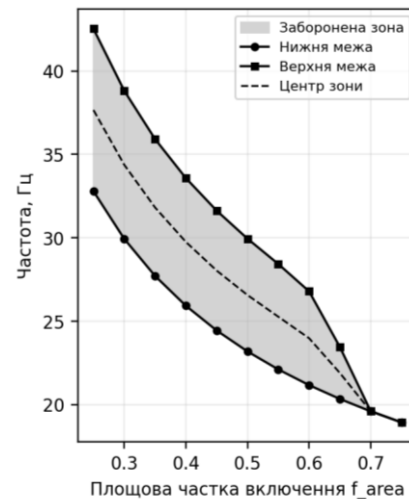


Рис. 2. Межі першої повної забороненої зони для двошарової бетонно-гумової конструкції

### Результати чисельного дослідження.

На рисунку 2 наведено зміну меж першої повної забороненої зони для двошарової конструкції залежно від площової частки включення. Отримані результати показують, що зі збільшенням  $f_{area}$  нижня межа зони зміщується в область менших частот, однак це супроводжується поступовим зменшенням її ширини. Таким чином, для двошарової конструкції спостерігається типовий компроміс між шириною

забороненої зони та її частотним положенням.

Аналогічна залежність для тришарової конструкції показана на рисунку 3. Додавання важкого внутрішнього ядра призводить до суттєвого зниження нижньої межі забороненої зони в усьому дослідженому діапазоні  $f_{area}$ . Водночас ширина зони для тришарової конфігурації виявляється меншою, ніж для двошарової, що свідчить про інший механізм формування робочого частотного діапазону.

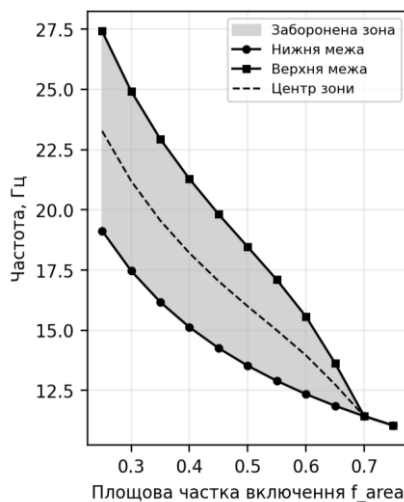


Рис. 3. Межі першої повної забороненої зони для тришарової бетонно-гумової конструкції

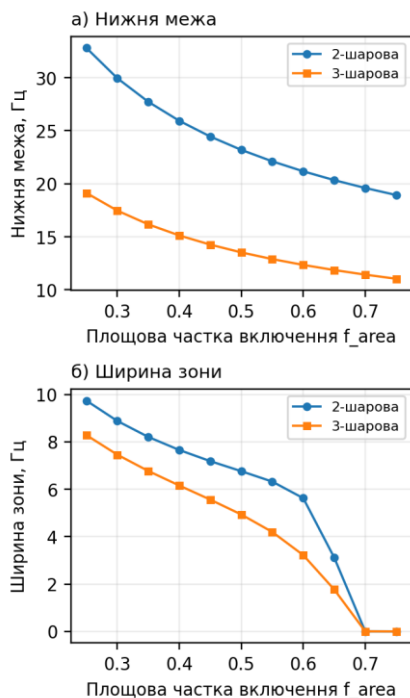


Рис. 4. Порівняння параметрів першої забороненої зони: а – нижня межа; б – ширина

Порівняння двох моделей за нижньою межею та шириною забороненої зони наведено на рисунку 4. З рисунку 4, а видно, що перехід від двошарової до тришарової конструкції зміщує всі розглянуті режими в область нижчих частот. Разом із тим рисунок 4, б демонструє, що двошарова конфігурація практично в усьому діапазоні  $f_{area}$  забезпечує більшу ширину першої повної забороненої зони. Отже, дві архітектури не є взаємозамінними: вибір між ними повинен визначатися інженерним пріоритетом.

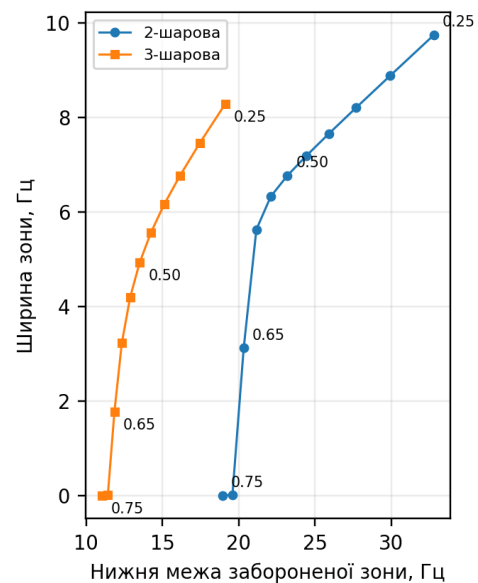


Рис. 5. Компроміс між нижньою межею та шириною першої повної забороненої зони

Для наочнішої оцінки компромісу між двома основними критеріями на рисунку 5 побудовано залежність ширини забороненої зони від її нижньої межі. Кожна точка відповідає окремому значенню  $f_{area}$ . З цього рисунку видно, що перехід від двошарової до тришарової конструкції зміщує точки в область нижчих частот, але супроводжується зменшенням ширини забороненої зони. У результаті двошарова конфігурація є доцільнішою для задач, у яких необхідно забезпечити ширший робочий діапазон пригнічення хвиль, тоді як тришарова – для випадків, коли першочерговим є зниження частотної межі відсікання.

Узагальнюючи отримані результати, можна зазначити, що збільшення площової

частки включення в обох моделях сприяє зміщенню першої забороненої зони до нижчих частот, але не супроводжується зростанням її ширини. Для двошарової конструкції цей ефект проявляється у вигляді відносно широкої, але вищої за частотою зони, тоді як тришарова система з важким ядром формує нижчий робочий діапазон ціною його звуження. Такий результат не означає абсолютної переваги однієї конфігурації над іншою, а вказує на необхідність підбору архітектури періодичної конструкції відповідно до цільового частотного діапазону та вимог до ширини зони пригнічення хвиль

### Висновки

Проведене чисельне дослідження двошарової і тришарової двовимірних бетонно-гумових періодичних конструкцій показало, що обидві конфігурації здатні формувати першу повну заборонену зону в низькочастотному діапазоні, проте характер її зміни залежно від площової частки включення для них є різним. Для обох моделей збільшення  $f\_area$  приводить до

зниження нижньої межі забороненої зони, однак одночасно супроводжується зменшенням її ширини. Установлено, що двошарова конструкція доцільніша у випадках, коли головним критерієм є ширина першої повної забороненої зони, тоді як тришарова конструкція з важким внутрішнім ядром є ефективнішою, коли необхідно змістити робочий частотний діапазон у нижчу область. Таким чином, розглянуті архітектури реалізують два різні підходи до керування хвильовими властивостями періодичного фундаменту. Отримані результати можуть слугувати основою для подальшого проектування двовимірних віброзахисних і сейсмоізоляційних фундаментних систем, а також для наступних досліджень, пов'язаних із розширенням геометричних параметрів і переходом до просторових моделей.

**Подяка.** Ця робота підтримана Європейською Комісією в межах проекту HORIZON 2020 «Effective Factorisation techniques for matrix-functions: Developing theory, numerical methods and impactful applications», угода про грант ID: 101008140.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ghafar W. A., Zhong T., Lai Z., Pingle Z., Yang Y. & Hasan M. M. Seismic isolation for existing structures : a review of retrofitting techniques, case studies, and trends. *Discover Civil Engineering*. 2025. Vol. 2. Article 137. DOI: 10.1007/s44290-025-00300-1.
2. Xiang H. J., Shi Z. F., Wang S. J. & Mo Y. L. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations : experimental validation. *Smart Materials and Structures*. 2012. Vol. 21. № 11. Article 112003. DOI: 10.1088/0964-1726/21/11/112003.
3. Shi Z., Cheng Z. & Xiang H. Seismic isolation foundations with effective attenuation zones. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2014. Vol. 57. Pp. 143–151. DOI: 10.1016/j.soildyn.2013.11.009.
4. Aravantinos-Zafiris N. & Sigalas M. M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 118, № 6. Article 064901. DOI: 10.1063/1.4928405.
5. Gupta A., Sharma R., Thakur A. & Gulia P. Metamaterial foundation for seismic wave attenuation for low and wide frequency band. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article 2293. DOI: 10.1038/s41598-023-27678-1.
6. Zhao C., Zeng C., Huang H., Dai J., Bai W., Wang J. & Mo Y. L. Preliminary study on the periodic base isolation effectiveness and experimental validation. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 226. Article 111364. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111364.
7. Masoom M. N., Karim Q. ul Ain, Badar I., Khushnood R. A., Najam F. A. & Naseer A. Development of a new base isolation system using the concept of metamaterials. *Engineering Structures*. 2023. Vol. 286. Article 116151. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116151.
8. Wu Q., Xu Z., Xu P., Zeng W. & Chen X. Optimal design for rubber concrete layered periodic foundations based on the analytical approximations of band gaps and mapping relations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2024. Vol. 23. Pp. 593–608. DOI: 10.1007/s11803-024-2259-3.
9. Muhammad & Lim C. W. From Photonic Crystals to Seismic Metamaterials: A Review via Phononic Crystals and Acoustic Metamaterials. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. Vol. 29, № 2. Pp. 1137–1198. DOI: 10.1007/s11831-021-09612-8.
10. Oz M. F., Kumbasaroglu A., Yalciner H., Korozlu N., Babacan Y., Cimilli Çatır F. E. & Sayarcan D. Experimental Investigation of Metamaterial-Inspired Periodic Foundation Systems with Embedded Piezoelectric Layers for Seismic Vibration Attenuation. *Buildings*. 2025. Vol. 15, № 24. Article 4399. DOI: 10.3390/buildings15244399.

## REFERENCES

1. Ghafar W.A., Zhong T., Lai Z., Pingle Z., Yang Y. and Hasan M.M. Seismic isolation for existing structures : a review of retrofitting techniques, case studies, and trends. *Discover Civil Engineering*. 2025, vol. 2, article 137. DOI: 10.1007/s44290-025-00300-1.
2. Xiang H.J., Shi Z.F., Wang S.J. and Mo Y.L. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations : experimental validation. *Smart Materials and Structures*. 2012, vol. 21, no. 11, article 112003. DOI: 10.1088/0964-1726/21/11/112003.
3. Shi Z., Cheng Z. and Xiang H. Seismic isolation foundations with effective attenuation zones. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2014, vol. 57, pp. 143–151. DOI: 10.1016/j.soildyn.2013.11.009.
4. Aravantinos-Zafiris N. and Sigalas M.M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015, vol. 118, no. 6, article 064901. DOI: 10.1063/1.4928405.
5. Gupta A., Sharma R., Thakur A. and Gulia P. Metamaterial foundation for seismic wave attenuation for low and wide frequency band. *Scientific Reports*. 2023, vol. 13, article 2293. DOI: 10.1038/s41598-023-27678-1.
6. Zhao C., Zeng C., Huang H., Dai J., Bai W., Wang J. and Mo Y.L. Preliminary study on the periodic base isolation effectiveness and experimental validation. *Engineering Structures*. 2021, vol. 226, article 111364. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111364.
7. Masoom M.N., Karim Q. ul Ain, Badar I., Khushnood R.A., Najam F.A. and Naseer A. Development of a new base isolation system using the concept of metamaterials. *Engineering Structures*. 2023, vol. 286, article 116151. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116151.
8. Wu Q., Xu Z., Xu P., Zeng W. and Chen X. Optimal design for rubber concrete layered periodic foundations based on the analytical approximations of band gaps and mapping relations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2024, vol. 23, pp. 593–608. DOI: 10.1007/s11803-024-2259-3.
9. Muhammad and Lim C.W. From Photonic Crystals to Seismic Metamaterials : a Review via Phononic Crystals and Acoustic Metamaterials. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022, vol. 29, no. 2, pp. 1137–1198. DOI: 10.1007/s11831-021-09612-8.
10. Oz M.F., Kumbasaroglu A., Yalciner H., Korozlu N., Babacan Y., Cimilli Çatır F.E. and Sayarcan D. Experimental Investigation of Metamaterial-Inspired Periodic Foundation Systems with Embedded Piezoelectric Layers for Seismic Vibration Attenuation. *Buildings*. 2025, vol. 15, no. 24, article 4399. DOI: 10.3390/buildings15244399.

Надійшла до редакції: 23.03.2026.

Прийнято після рецензування: 05.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 621.774.38

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.68.1244

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ ВТОРИННОТВЕРДЮЧИХ ШТАМПОВИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБНОГО ІНСТРУМЕНТУ

ДЕЙНЕКО Л. М.<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, проф.,

КРИВЧИК Л. С.<sup>2</sup>, доктор філософії,

ПІНЧУК В. Л.<sup>3</sup>, здоб.,

СТОЛБОВИЙ В. О.<sup>4</sup>, докт. техн. наук, проф.

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-44, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), <https://orcid.org/0000-0001-9662-4608>

<sup>2</sup> Відокремлений структурний підрозділ, Нікопольський фаховий коледж, Український державний університет науки і технологій, пр. Трубників, 18, 53210, Нікополь, Україна, тел. + 38 (050) 723-16-46, e-mail: [lcrivchik@gmail.com](mailto:lcrivchik@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7769-3808>

<sup>3</sup> Відокремлений структурний підрозділ, Нікопольський фаховий коледж, Український державний університет науки і технологій, пр. Трубників, 18, 53210, Нікополь, Україна, тел. +38 (066) 044-17-39, e-mail: [v.l.pinchuk@nmt.org.ua](mailto:v.l.pinchuk@nmt.org.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8257-9252>

<sup>4</sup> Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», вул. Академічна, 1, 61108, Харків, Україна, тел. +38 (057) 335-35-30, e-mail: [nsc@kipt.kharkov.ua](mailto:nsc@kipt.kharkov.ua), <https://orcid.org/0000-0001-7734-0642>

**Анотація.** *Постановка проблеми.* В Україні виробництво труб є однією з найбільш важливих галузей народного господарства. Багато труб використовують нафтова та газова промисловість. Але, крім цього, також важливим споживачем є машинобудівельна, автомобільна, тракторна, суднобудівельна, авіаційна промисловості та інші галузі народного господарства. Виробництво труб з легованих та високолегованих марок сталей захвачує майже всі галузі промисловості. Широке поширення одержав процес виробництва сталевих труб методом пресування на гідравлічних пресах. Спосіб гарячого пресування дозволяє виготовляти труби із усіх важкодеформуємих сталей і сплавів. На відміну від трубопрокатних установок на пресах, можна одержати труби з більш тонкою стінкою й меншого діаметра. Трубопресовий інструмент піддається інтенсивному зносу. За умовами експлуатації прес-голки, матриці, експандери відносяться до важко навантаженого інструменту, процес відбувається при високих температурах, тисках та інтенсивному терті. **Мета статті.** Дослідити різноманітні технології іонно-плазмового азотування штампових сталей для виготовлення трубопресового інструменту з метою підвищення міцності, зносостійкості, експлуатаційної стійкості при виробництві труб з корозійностійких високолегованих сталей. При виробництві труб з високолегованих сталей застосовують процес експандування. Експандування заготовки здійснюють експандером, при цьому на передньому кінці експандера співвісно закріплена прошивна голка. Сталі для інструменту гарячого пресування мають тривалий контакт із гарячим металом, робочий інструмент працює в умовах високих температур, інтенсивних швидкостей ковзання і значного навантаження, що зумовлює необхідність використати високолеговані теплостійкі вториннотвердіючі інструментальні сталі, що володіють підвищеною в'язкістю і міцністю. **Висновок.** Запропоновані технології зміцнення трубопресового інструменту з використанням іонно-плазмового азотування дають можливість збільшити ресурс роботи трубопресового інструменту. Для експандерів трубопрофільного пресу з сталі 4Х4ВМФС після реалізації комплексної обробки з використанням глибокого іонно-плазмового азотування, комплексних обробок з використанням загартування, відпусків при різних температурах і наступного азотування значно на 25–30 % збільшені експлуатаційні властивості інструменту і термін його експлуатації, а також якість його поверхні, що значно поліпшує якість внутрішньої поверхні труб з високолегованих сталей.

**Ключові слова:** експандер; азотування; пресування; загартування; відпуск; пресування; в'язкість; міцність

## FEATURES OF ION-PLAZA NITRIDING TECHNOLOGIES OF SECONDARY-HARDENING STAMP STEELS FOR MANUFACTURING TUBE TOOLS

DEINEKO L.M.<sup>1\*</sup>, Dr Sc. (Tech.), Prof.,

KRYVCHIK L.S.<sup>2</sup>, PhD,

PINCHUK V.L.<sup>3</sup>, *PhD.*,  
STOLBOVYI V.O.<sup>4</sup>, *Dr Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-44, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), <https://orcid.org/0000-0001-9662-4608>

<sup>2</sup> Separate Structural Unit Nikopol Professional College, Ukrainian State University of Science and Technologies, 18, Trubnyky Ave., Nikopol, 53210, Ukraine, tel. +38 (050) 723-16-46, e-mail: [lcrivchik@gmail.com](mailto:lcrivchik@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7769-3808>

<sup>3</sup> Separate structural unit Nikopol Professional College, Ukrainian State University of Science and Technology, 18, Trubnyky Ave., Nikopol, 53210, Ukraine, tel. +38 (066) 044-17-39, e-mail: [v.l.pinchuk@nmt.org.ua](mailto:v.l.pinchuk@nmt.org.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8257-9252>

<sup>4</sup> National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, 1, Akademichna St., Kharkiv, 61108, Ukraine, tel. +38 (057) 335-35-30, e-mail: [nsc@kipt.kharkov.ua](mailto:nsc@kipt.kharkov.ua), <https://orcid.org/0000-0001-7734-0642>

**Abstract. Problem statement.** In Ukraine, pipe production is one of the most important sectors of the national economy. The oil and gas industry uses a lot of pipes. But, in addition, the machine-building, automobile, tractor, shipbuilding, aviation industries and other sectors of the national economy are also important consumers. The production of pipes from alloyed and high-alloy steel grades covers almost all industries. The process of producing steel pipes by pressing on hydraulic presses has become widespread. The hot pressing method allows pipes to be manufactured from all difficult-to-deform steels and alloys. Unlike pipe rolling plants on presses, pipes with a thinner wall and a smaller diameter can be obtained. The pipe pressing tool is subject to intensive wear. According to the operating conditions, press needles, matrices, expanders are heavily loaded tools, the process occurs at high temperatures, pressures and intense friction. **The purpose of the article.** To investigate various technologies of ion-plasma nitriding of die steels for the manufacture of pipe pressing tools in order to increase strength, wear resistance, and operational stability in the production of pipes from corrosion-resistant high-alloy steels. In the production of pipes from high-alloy steels, the expanding process is used. The expansion of the workpiece is carried out by an expander, with a piercing needle coaxially fixed at the front end of the expander. Steels for hot pressing tools have long-term contact with hot metal, the working tool operates in conditions of high temperatures, intense sliding speeds, and significant load, which necessitates the use of high-alloy heat-resistant secondary hardening tool steels with increased toughness and strength. **Conclusion.** The proposed technologies for strengthening pipe pressing tools using ion-plasma nitriding make it possible to increase the service life of the pipe pressing tool. For expanders of a pipe profile press made of 4X4VMFS steel, after implementing complex processing using deep ion-plasma nitriding, complex processing using hardening, tempering at different temperatures and subsequent nitriding, the operational properties of the tool and its service life, as well as the quality of its surface, are significantly increased by 25–30 %, which significantly improves the quality of the inner surface of pipes made of high-alloy steels.

**Keywords:** *expander; nitriding; pressing; hardening; tempering; pressing; viscosity; strength*

**Постановка проблеми.** Азотування широко застосовується в різних галузях промисловості для підвищення довговічності і надійності деталей і інструментів. Для цього в наш час на підприємствах в основному використовують, як традиційне, газове азотування, так і нову прогресивну технологію – іонного азотування. При іонному азотуванні дифузійне насичення поверхні азотом відбувається з використанням низькотемпературної плазми [1]. Спосіб дифузійного насичення поверхні азотом з використанням низькотемпературної плазми характеризується значно вищою швидкістю дифузії, відсутністю викривлення поверхні, можливістю значного зниження температури процесу і екологічною чистотою. У процесі насичення під дією іонного бомбардування в матеріалі виникає надмірна концентрація структурних дефектів, що сприяє підвищенню інтенсивності

процесів дифузії і в тому числі масопереносу азоту і створює можливість для появи нових фаз, які не утворюються в умовах звичайного насичення при підвищеній температурі [2–4].

Вивчення особливостей різноманітних технологій іонно-плазмового азотування трубного інструменту для пресування корозійностійких труб на трубопрофільних пресах, взаємозв'язку між технологією процесу, структурою і властивостями металу дозволяє прискорити перехід до більш прогресивних технологій для підвищення якісних характеристик інструменту і збільшення ресурсу його роботи [5].

**Аналіз публікацій.** Встановлено, що твердість азотованого шару є вищою, ніж цементованого, і зберігається при нагріванні до високих температур 450–500 °С, тоді як твердість цементованого шару деталей, метал яких має мартенситну структуру, зберігається тільки до 200–225 °С.

Після азотування сталь і чавун набувають:

- високої твердості на поверхні, яка не змінюється при нагріванні до температури 500–600 °С;
- високої межі витривалості;
- високої кавітаційної стійкості;
- високої корозійної стійкості на повітрі, у прісній воді і у водяній парі [7].

Азотований шар добре шліфується і полірується. Азотують вуглецеві сталі та сталі, що леговані алюмінієм, молібденом, ванадієм, титаном, бором та іншими елементами, а також чавуни, з яких виготовляють деталі паливних насосів, гільзи та циліндри двигунів внутрішнього згорання, зубчасті колеса, колінчасті вали, деталі турбін, парових установок тощо.

Значного поширення у практиці ХТО набувають атмосфери на основі частково дисоційованого аміаку і компонентів, що містять вуглець: природного чи світильного

газу, продуктів піролізу вуглеводнів, синтину, газу, спирту тощо. Як рідкі середовища для азотування використовують розплави ціаністих солей лужних металів (KCN; NaCN; NaCNO та ін.) з домішками карбонатів ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ;  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) у різних пропорціях, а також розплави на основі карбаміду  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  з такими самими домішками.

В результаті азотування метал поверхневого шару має високі твердість, зносо-, задиро- і теплостійкість, високий опір втомі та корозії. При реалізації низько- та середньотемпературного азотування деформація виробів, що обробляються, істотно нижча, ніж, наприклад, після цементації та загартування. Крім цього, температурний інтервал низькотемпературного азотування дозволяє поєднати в єдиному режимі азотування та відпуск попередньо загартованого виробу [8].

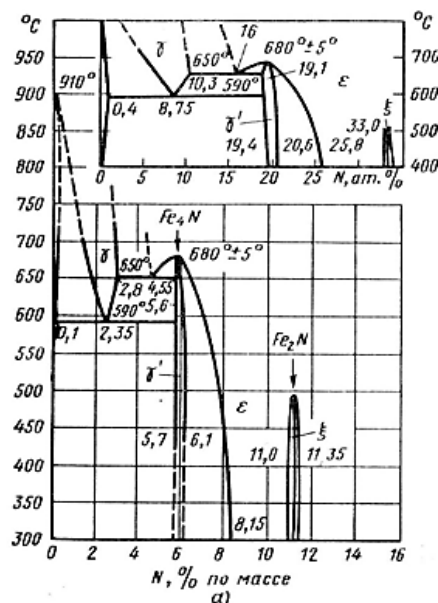


Рис. 1. Діаграма стану Fe–N

Послідовність утворення фаз у металі при дифузійному насиченні азотом відповідає послідовності їх розташування на діаграмі стану Fe–N (рис. 1). Наприклад, при температурі азотування 550 °С спочатку утворюється азотистий ферит (α-фаза), потім γ-фаза (азотистий аустеніт), γ'-фаза (Fe<sub>4</sub>N –

проміжна фаза змінного складу з ГЦК ґратками) і в зовнішньому шарі металу – ε – фаза (проміжна фаза з ГП ґратками та широкою областю гомогенності).

Мікроструктура азотованого шару сталі 4Х5МФ1С після азотування показана на рисунку 2.

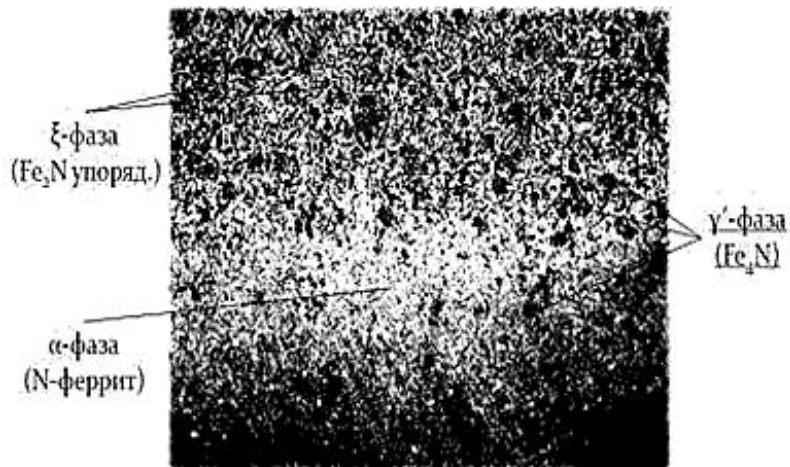
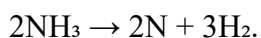


Рис. 2. Мікроструктура азотованого шару сталі 4X5MФ1С після азотування,  $\times 400$

При азотуванні легованих сталей утворюються леговані  $\epsilon$ - і  $\gamma$ -фази. Легуючі елементи Al, Mo, B, Ti, V, W підвищують розчинність азоту в  $\alpha$ -фазі й утворюють спеціальні нітриди типу MN, M<sub>2</sub>N (наприклад VN, TiN, Cr<sub>2</sub>N та інші). Виділяючись у дрібнодисперсному стані, ці нітриди підвищують твердість азотованого шару та його термічну стійкість. Найпоширенішими марками сталей, що піддають азотуванню, є 38ХМЮА; 40ХНМА; 18Х2Н4МА, 4Х5МФ1С, 4Х4ВМФС та інші. При азотуванні отримують шар товщиною 0,3–0,6 мм із твердістю 700–1200 HV [9].

Найпоширенішим є газове азотування, яке проводиться в середовищі амоніаку. При нагріванні амоніак дисоціює з утворенням атомарного азоту та водню за реакцією:



Атомарний азот адсорбується поверхнею металу та дифундує у кристалічну ґратку заліза. Унаслідок цього формується азотований шар із підвищеною твердістю. Азот добре розчиняється в  $\alpha$ -залізі. Його розчинність становить приблизно 0,01 % при температурі 20 °С і підвищується до близько 0,1 % при нагріванні до 591 °С. Це дає можливість проводити азотування при відносно низьких температурах (приблизно 500–580 °С), що значно нижче температур, характерних для цементації. Завдяки цьому зменшується деформація виробів і зберігаються їх точні

геометричні розміри [9]. Газове пічне азотування відбувається в негерметичних шахтних або ковпакових печах, і наявність деякої кількості аміаку та його сполук в повітрі робочої зони є неминучим. Процес характеризується низкою суттєвих небезпек, зокрема використанням аміаку, який характеризується сенсibiliзуючою, мутагенною та тератогенною дією на організм людини. Для мінімізації шкідливості необхідно забезпечити потужну вентиляцію, автоматичний контроль герметичності печей та суворе дотримання техніки безпеки.

Для скорочення тривалості процесу (в 2...3 рази), підвищення якості азотованого шару і зменшення його крихкості широко застосовується іонно-плазмене азотування [10].

Принцип дії ПА полягає в тому, що в розрядженому ( $P = 150\text{--}1000$  Па) азотовмісному газовому середовищі між катодом – деталями і анодом – стінками вакуумної камери – викликається аномальний розряд, який утворює активне середовище (іони, атоми), що забезпечує формуванню азотованого шару. Технологічними факторами, які впливають на ефективність іонного азотування, являються температура процесу, тривалість насичення, тиск, склад і витрати робочої газової суміші. Температурний діапазон іонного азотування при зміцненні сталей більше, ніж газового і заходиться в межах 400–700 °С. Обробка при температурах

нижче 500 °С особливо ефективна при зміцненні виробів з легованих сталей, тому що значно підвищує їх експлуатаційні властивості при збереженні твердості серцевини на рівні 55–60 HRC.

Використання методу пічного азотування сталей із застосуванням аміаку при температурах від 500 до 600 °С дозволяють досягти товщини азотованого шару в межах 0,2–0,6 мм за час від 10 до 90 годин обробки. Застосування каталітичного азотування із застосуванням спеціальних каталізаторів для дисоціації аміаку дозволяють знизити тривалість обробки печі до двох разів. Іонне азотування в газовій плазмі вакуумно-дугових установках при температурах від 500 до 600 °С дозволяє скоротити час азотування до 1 години, регулювати фазовий склад, змінюючи співвідношення робочих газів у суміші, для досягнення необхідного ефекту, а також позбутися шкідливого впливу аміаку. Іонно-плазмове азотування широко

застосовується для зміцнення інструменту із загартованих сталей [11].

**Мета статті.** Обґрунтування запропонованих різноманітних технологій іонно-плазмового азотування штампових сталей з метою підвищення міцності, зносостійкості, експлуатаційної стійкості при виробництві труб з корозійностійких високолегованих сталей.

**Результати досліджень.** Спосіб іонно-плазмового азотування трубопресового інструменту в вакуумно-дуговому розряді проведений в установці з вакуумною камерою, забезпеченою дуговими випарниками. На рисунку 3 приведена схема установки «Булат-6», яка використана для азотування інструменту в дуговому газовому розряді.

Азотування проводиться після попереднього відкачування до тиску 0,003 Па і тиску азоту (при напуску азоту) 0,3 Па. Регулюючи позитивний потенціал в межах від 100 до 150 В; протягом однієї години підтримувалась температура азотування 650–700 °С.

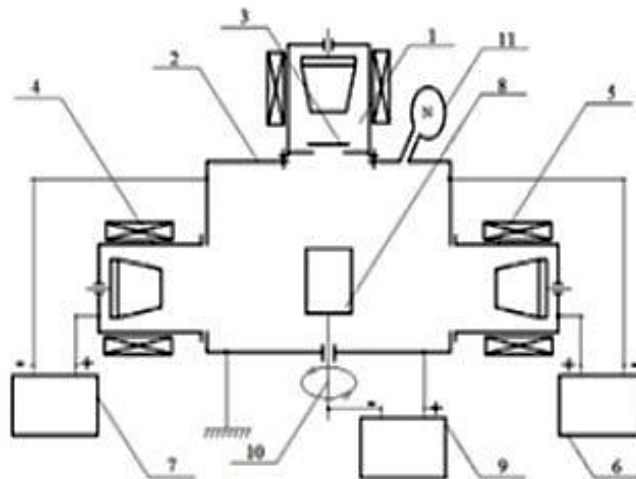


Рис. 3. Принципова схема вакуумно-дугової установки типу «Булат-6» для іонного азотування:

1, 4, 5 – вакуумно-дугові випарники; 2 – вакуумна камера; 3 – циліндричний екран; 6, 7 – джерела живлення газового розряду; 8 – азотовані вироби; 9 – високовольтне джерело; 10 – поворотний пристрій; 11 – натікач

Двоступінчастий вакуумно-дуговий розряд (ДВДР) є розрядом, в якому позитивний стовп дуги розділений на два ступені, перший з яких являє собою вакуумну дугу з холодним катодом – 10, а другий ступінь – позитивний стовп дугового розряду в самій камері – 1 в плазмі робочого газу азоту низького тиску – 4.

Плазма ДВДР застосовується для азотування, та іонного очищення (нагріву) поверхонь деталей. У ДВДР існує дві різноманітні області: газометалева плазма закрита кільцевим екраном – 2, що не пропускає металеві іони з боку катода – 10 і газової плазми поблизу анода – 5. Деталь, що азотується – 3 знаходиться в області газової

плазми, для рівномірного нагріву деталей обертається за допомогою поворотного пристрою – 8.

Вакуумно-дугове азотування у плазмі двоступеневого розряду відбувається таким чином. Розпорошені з поверхні катода – 10 – частинки металу не проникають у робочу частину вакуумного об'єму – 1, а залишаються обсягом перед екраном – 2. Екран являє собою два диски, що пропускають іони іонізованого газу, і затримують іони та атоми металу. А з іншого боку камери подається потенціал на водоохолоджуваний анод – 5. У цьому випадку це магнітна котушка, що фокусує і стабілізує, електрично відірвана від корпусу камери. На неї подається плюс джерела дуги. Всередину камери подається газ (азот)  $P = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр. Магнітні котушки є анодом для газової плазми і у вакуумній камері

запалиться так званий двоступінчастий розряд. А при подачі на поворотний пристрій – 8, на якому знаходиться азотована деталь – 3 негативного потенціалу – 1300 В від високовольтного джерела – 7, буде призводити до швидкого нагрівання деталі – 3. При нагріві інструменту до 470–550 °С відбуватиметься процес азотування. Нагрів деталі, що азотуються, регулюється анодним струмом, тиском у вакуумній камері і потенціалом на поворотному пристрої [12].

Швидкість і глибина азотованого шару буде залежати від температури деталі, іонного струму на деталі залежить та від щільності газової плазми ДВДР, а також від самого азотованого матеріалу. Температура деталі, що нагрівається, залежить від прикладеного потенціалу. Характер осцилограми при потенціалі – 1300 В у процесі азотування наведено на рисунку 4.

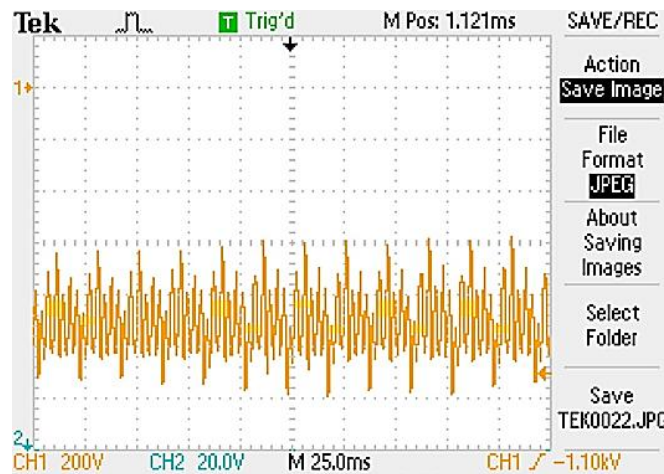


Рис. 4. Осцилограма постійного потенціалу – 1300 В у процесі азотування в газовій плазмі двоступеневого вакуумно-дугового розряду

Загальний вигляд установки «Булат-6» (ННЦ ХФТІ) показаний на рисунку 5, а. Установка інструменту в камері показана на рисунку 5, б.

Зразки перед загрузкою у вакуумну камеру проходять механічну очистку (за потреби), потім промивають лужним розчином в ультразвуковій ванні і остаточно промивають нефрасом С2 – 80/120. Вакуумну камеру відкачувал до тиску  $P = 0,3 \cdot 10^{-3}$  Па. Після досягнення необхідного вакууму в камеру дозовано напускається газ азот до тиску  $P = 0,6$  Па і проводиться іонне

очищення та активацію поверхні підкладок у газовому вакуумно-дуговому розряді, який дозволяє проводити очистку прискореними іонами газової плазми (без металевих іонів). Газовий вакуумно-дуговий розряд є розрядом, в якому позитивний стовп дуги розділений на два ступені, перший з яких являє собою вакуумну дугу з холодним катодом, а другий ступінь – позитивний стовп дугового розряду знаходиться за металевим екраном, він не пропускає іони випаровуваного металу в саму камеру [13].



а

б

Рис. 5. Загальний вигляд установки «Булат-6» (ННЦ ХФТИ) (а) і установка інструменту в камері (б)

Якісне очищення та активація поверхні зразків перед процесом азотування дозволяє видалити можливі забруднення та оксиди, що можуть перешкоджати якісному процесу азотування. Швидкість і глибина азотування

залежить від іонного струму на деталі, що пов'язано з щільністю газової плазми вакуумно-дугового розряду, а також від температури нагріву деталі та від прикладеного потенціалу.



Рис. 6. Вигляд садки для процесу іонного азотування

Азотування проводилось при струмі катоду  $I_k = -100$  А, струм на аноді  $I_A = 100$  А. Напряга на поворотному механізмі  $U_p = -1100$  від джерела живлення. Тиск азоту у вакуумно-дуговій камері під час очищення  $P_N = 0,6$  Па. Температура металу зразків була  $550...620$  °С, час азотування 1–2 години.

Вигляд садки для іонного азотування показаний на рисунку 6.

В промисловості на горизонтальному гідравлічному пресі здійснюється тільки операція пресування труб з гільз, отриманих прошивкою на вертикальних пресах або свердлуванням і подальшим експандуванням. Експандування дозволяє використати заготовки більшої довжини, ніж при прошивці (відношення довжини заготовки до її діаметра при експандуванні може досягати 10–11, а при прошивці не перевищує 6–8), що підвищує

продуктивність пресів, однак збільшує трудомісткість виробництва за рахунок введення операції свердлування наскрізного отвору в заготівлі. Для експандування свердлених гільз застосовують оправки спеціальної форми – експандери. Поверхня пресового інструменту відчуває питомий тиск, рівень якого наближається до межі міцності матеріалу, з якого виготовлений інструмент. При пресуванні сталей поверхня експандерів може розігріватися до 800–850 °С, що обумовлює перебіг процесів термовтоми та розпалу металу поверхні [14].

Однією з основних причин виходу з ладу експандерів є розвиток процесів термомеханічної втоми, що призводять до появи сітки тріщин «розпалу». Умови роботи експандерів: нагрівання заготовки перед прошивкою, встановлення експандера на голку, прошивка заготовки. Експлуатаційна стійкість експандеру – 100 циклів.

З урахуванням умов експлуатації до матеріалу ставляться такі вимоги: висока теплостійкість; в'язкість; висока розгаростійкість; зносостійкість; жаростійкість; висока теплопровідність [15].

Тому штампові сталі, з яких виготовляється інструмент, повинні мати:

- високу теплостійкість, що забезпечує необхідний опір пластичної деформації робочій поверхні штампу при нагріванні. Вона характеризується за температурою, при якій межа плинності залишається не нижче 900–1000 МПа, оскільки питомі

навантаження при гарячому штампуванні досягають 800–900 МПа, а також за температурою нагріву, після якого сталь зберігає твердість HRC 40–50;

- високу стійкість проти розпалу; вона тим краще, що більше в'язкість і теплопровідність металу;

- стійкість інструменту проти взаємодії з матеріалом заготовки, а також окалиностійкість.

Теплостійкість штампових сталей створюється складним легуванням хромом, молібденом, вольфрамом і ванадієм [16]. Хімічний склад та призначення основних марок штампових сталей регламентовано ДСТУ 3953-2000.

Сталь 4X4BMФC (ДІ-22) є сталлю підвищеної теплостійкості та в'язкості. Це найбільш широко використовувана сталь для більшості інструментів гарячого деформування, прес-форм лиття під тиском, трубопресового інструменту горизонтальних пресів (матричні кільця складних матриць, голки-оправки, експандери, втулки). Відмінною особливістю її є підвищений вміст карбідоутворюючих елементів (хрому, молібдену, вольфраму, ванадію).

Температури загартування теплостійких сталей вибирають з умов отримання найбільшої твердості при збереженні досить дрібного зерна аустеніту, що забезпечує краще поєднання експлуатаційних властивостей інструменту. Хімічний склад сталі наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 4X4BMФC, % по масі (ДСТУ 3953-2000), AISI 4140 (USA)

C	Si	Mn	Cr	V	Mo	W	Ni	Cu	S	P
						Не більше				
0,37	0,6	0,20	3,2	0,6	1,20	0,8	0,6	0,30	0,03	0,03
0,44	1,0	0,50	4	0,9	1,50	1,2				

Зарубіжними аналогами сталі 4X4BMФC є сталі 30WCrV17-2, 45WCrV7, X30WCrV5-3, X30WCrV9-3, X40CrMoV5-1 (DIN, WNr – Німеччина), SKD62 (JIS – Японія), H12, T20812 (США). Відмінною особливістю сталі 4X4BMФC від сталей помірної теплостійкості є підвищений вміст

карбідоутворюювальних елементів (хрому, молібдену, вольфраму, ванадію) при 0,3–0,4 % C.

Для отримання більш високої стійкості до зношування та деформації проводить загартування інструменту з підвищених

температур аустенізації з отриманням в металі інструменту зерна аустеніту № 7–8.

Традиційна сучасна технологія зміцнення пресового і штампового інструмента з напівтеплостійких штампових сталей – це високотемпературне загартування з відпуском. Ціль остаточної термічної обробки – одержання в готовому інструменті оптимальної комбінації основних властивостей: твердості, міцності, зносостійкості, в'язкості й теплостійкості [17].

Високотемпературне загартування проводиться для розчинення значної частини карбідів і одержання високолегованого мартенситу. Тому температури загартування – підвищені й обмежуються лише

необхідністю зберегти дрібне зерно й достатню в'язкість металу [18].

Проміжний підігрів інструменту до 800–850 °С при нагріві під загартування необхідний для запобігання розтріскування внаслідок низької теплопровідності штампових сталей.

Охолодження з температур аустенізації проводять в маслі М3–М16 з підігрівом до 50–70 °С або в полімерному середовищі. Структура сталі після загартування з відпусками являє собою сорбіт з дисперсними частками спеціальних карбідів, (які виділилися при відпуску мартенситу) та з можливою кількістю спеціальних карбідів, які не розчинилися в аустеніті при нагріванні під загартування [11].

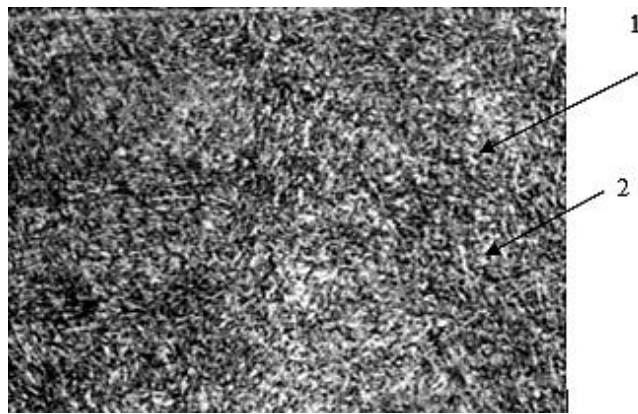


Рис. 7. Мікроструктура сталі 4Х4ВМФС після загартування від 1 070 °С і відпуску при 620–630 °С (1 відпуск), 560–580 °С (2 відпуск.) ×500:

1 – карбіди, які утворилися при відпуску мартенситу; 2 – сорбіт відпуску (матриця)

Вважається, що найбільш ефективним методом зміцнення пресового і штампового інструменту є його хіміко-термічна обробка.

Враховуючи складний характер роботи трубопресового інструменту для підвищення його експлуатаційної стійкості були запропоновані способи хіміко-термічної обробки з проведенням глибокого азотування у вакуумно-дуговому газовому розряді, загартування та відпуск (у різній послідовності).

Інструмент з температури азотування нагрівається до температури 900–950 °С, витримується і подальше нагрівається до температури загартування 1050–1070 °С, витримується, підстужується на повітрі до температури 900 °С і загартовується в полімерному середовищі, а перший відпуск

проводять при температурі не вище 240–250 °С з витримкою  $\geq 1$  години з подальшим нагрівом до температури другого відпуску не вище 350–380 °С з витримкою  $\geq 1$  години, а фінішний відпуск проводять при температурі не вище 580 °С [19].

Метою багаторазового відпуску є створення умов для раціонального структуроутворення в металі після загартування:

– перший відпуск проводять при температурах не вище 240–250 °С – це обумовлено тим, що при загартуванні легованих інструментальних сталей (для попередження розтріскування інтенсивне охолодження металу припиняють при температурах не нижче  $\sim 120$ – $130$  °С) за рахунок чого в металі остається до 28–30 %

аустеніту залишкового, який стійкий до перетворення при наступних відпусках. Тому доцільно перший відпуск робити в інтервалі температур виділення з мартенситу і аустеніту залишкового вуглецю, який утворює велику кількість часток нестабільного карбиду (типу  $\epsilon$ -карбид,  $Fe_{2,4}C$ ), які рівномірно розміщені у металі (тобто як на границях, так і в тілі зерен) і зменшує рівень напружень в металі;

– другий відпуск проводять при температурах не вище 350–380 °С – це обумовлено тим, що при розпаді мартенситу при температурах відпуску вище ~250 °С (для вуглецевих сталей частки нестабільного карбиду розчиняються або перетворюються у частки цементиту до цієї температури), а для легованих за більш високих температур відпуску утворюються частки цементиту або легovanого цементиту), які рівномірно розміщені у металі (тобто як на границях, так і в тілі зерен) і зменшується рівень напружень в металі, а також додатково створюються умови для повного перетворення залишкового аустеніту, який не розпався при першому відпуску, а також підготовлює твердий розчин до утворення часток спеціального карбиду при подальшому підвищенні температури відпуску;

– третій відпуск проводять за температури не вище 580 °С – відомо, що в легованих сталях температура виділення спеціальних карбідів починається при температурах  $\geq 480$ –490 °С, тому доцільно створити умови для процесів структуроутворення при яких в металі виникне велика кількість часток спеціальних карбідів, рівномірно розташованих по об'єму металу і які не зможуть збільшитися при цьому відпуску у розмірах за рахунок використання раціональної температури відпуску для кожного хімічного складу інструментальної сталі, яка конкретно використана при виготовленні виробів [20].

Така технологія вирішує завдання підвищення експлуатаційних властивостей інструментальної сталі за рахунок створення раціональних умов для процесів структуроутворення при використанні технологічної схеми: азотування,

загартування і багаторазові відпуски при різних температурах, що забезпечує збільшення зносостійкості при отриманні твердості азотованого шару ~ 9 ГПа.

Це дозволяє отримати інструмент з більш високим рівнем зносостійкості і твердості за рахунок конкретного набору операцій обробки та їх параметрів.

Структура інструменту після глибокого азотування і загартування з відпусками представлена на рисунку 8.

Інший пропонуємий спосіб хіміко-термічної обробки трубопресового інструменту зі штампових сталей включав нагрів до температури 10500–1070 °С, охолодження на повітрі до температури 900 °С, загартування в водному розчині полімерного середовища і триразовий відпуск, при цьому перший відпуск проводили при температурі не вище 240–250 °С з витримкою  $\geq 1$  години з подальшим нагрівом до температури другого відпуску не вище 350–380 °С з витримкою  $\geq 1$  години та нагрівом до температури третього відпуску (при температурі не вище 580 °С з витримкою  $\geq 2$  години), який був поєднаний з азотуванням в плазмовій установці з двоступеневим дуговим розрядом низького тиску до отримання поверхневого насичення азотом шару товщиною 50–70 мкм [21].

Метою проведених відпусків було створення раціональних умов для процесів структуроутворення при використанні технологічної схеми ХТО.

В наступній технології ХТО з використанням іонно-плазмового азотування операцію загартування з 1070–1080 °С здійснювали у водному розчині полімеру (можливо і у водному розчині хлориду) з подальшими відпусками при температурах не вище 240–250 °С (перший відпуск), наступний другий відпуск проводили при температурі не вище 350–380 °С, а третій відпуск був поєднаний з азотуванням спочатку за температури не вище 540 °С з витримкою більше 2 годин, а після цього продовжили азотування за температури не вище 580 °С з витримкою більше 2 годин, а охолодження проводили в атмосфері аміаку з піччю до 200 °С і далі на повітрі. Це дозволяє

отримати інструмент з більш високим рівнем зносостійкості і твердості за рахунок конкретного набору операцій обробки та їх

параметрів [22-23].

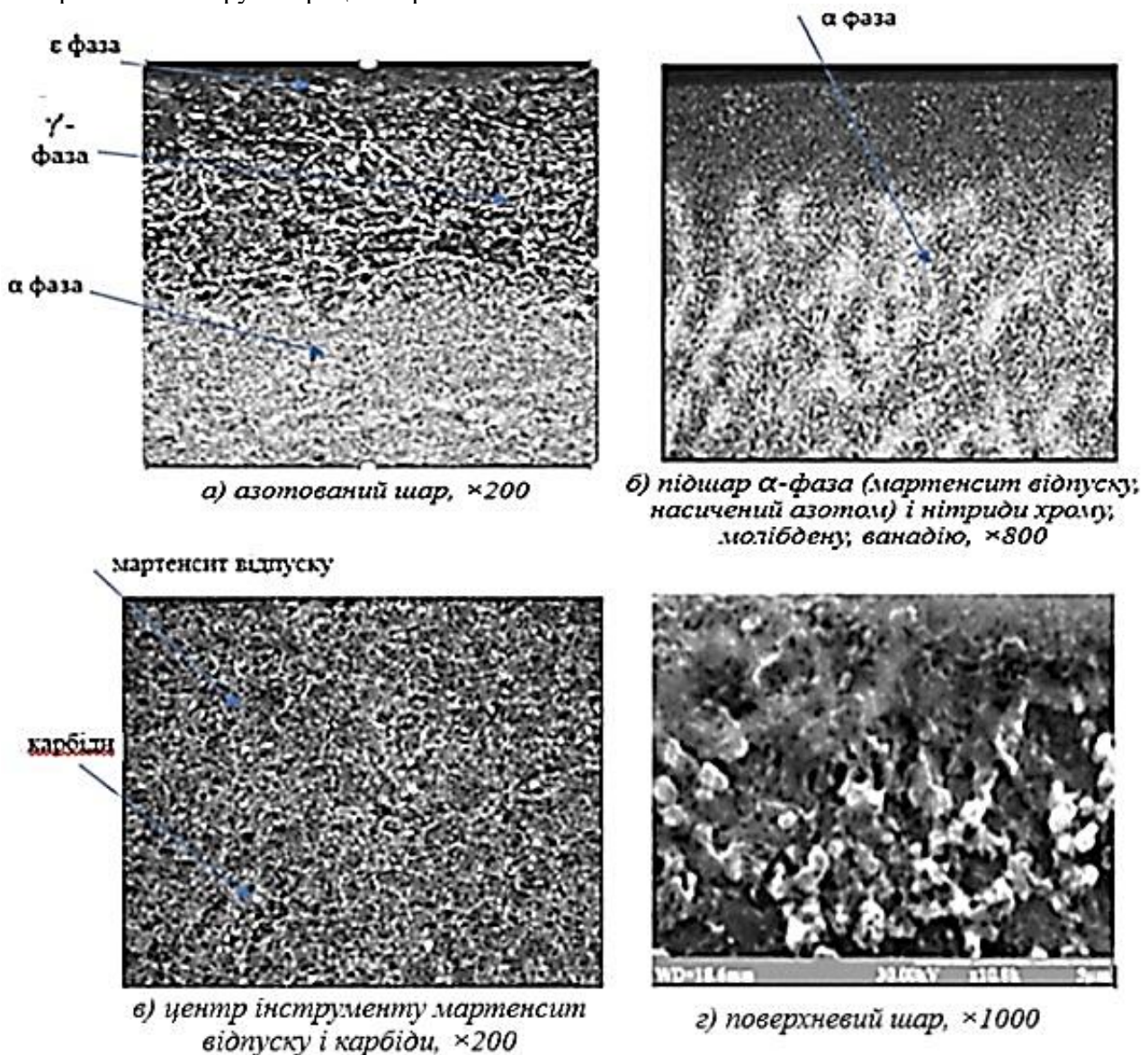


Рис. 8. Структура інструменту після глибокого азотування і загартування з відпусками: троосто-сорбітна структура з дисперсними спеціальними карбідами і карбіди, які не розчинилися при аустенізації,  $\times 200$

Атоми азоту, що проникли в поверхневий шар сталі, дифундують по об'єму сталі. Залежно від тривалості обробки виникає відповідний концентраційний профіль, що характеризує розподіл азоту по глибині [24].

Якщо на поверхні концентрація азоту досягає величини, необхідної для утворення  $\gamma'$ - і  $\epsilon$ -нітриду, то відзначається утворення саме цих нітридів. Вони ростуть з окремих зародків і швидко утворюють суцільний шар, який називається нітридним, або «шаром

сполук». Товщина шару, незалежно від вмісту азоту в зазвичай застосовуваних середовищах, збільшується в результаті подальшого поглинання азоту. Одночасно продовжується дифузія атомів азоту через шар сполук вглиб металу. При цьому швидкість їх дифузії через  $\gamma'$ -фазу приблизно в 25 разів, а через  $\epsilon$ -нітрид навіть в 60 разів менше, ніж через ферит.

В результаті обробки в приповерхневих шарах сталевих деталей можуть утворюватися шари з різним вмістом азоту. Найвищою

концентрацією азоту володіє зовнішній шар  $\epsilon$ -фази ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ). За ним глибше лежить шар з меншою концентрацією азоту  $\gamma^1$ -фаза ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ). Ще глибше знаходиться шар  $\gamma$ -фази (дифузійна зона). Далі знаходиться вже вихідний матеріал, наприклад  $\alpha$ -фаза заліза (у маловуглецевих сталях). При недостатньому ступені обробки верхні шари можуть відсутні. Шар сполук і дифузійна зона разом утворюють азотований шар [25].

При цьому за допомогою плазмового азотування можливо отримання:

– дифузійної зони з розвиненим нітридним шаром, що забезпечує високу стійкість до корозії і припрацьовуваність тертьових поверхонь – для деталей, що працюють на знос,

– дифузійної зони без нітридного шару – для ріжучого, штампувального інструменту або деталей, що працюють при високих тисках зі знакозмінними навантаженнями.

Плазмовим азотуванням можна поліпшити такі характеристики виробів:

- твердість;
- зносостійкість;
- втомну витривалість;

Основною перевагою методу є стабільна якість обробки з мінімальним розкидом властивостей від деталі до деталі, від завантаження до завантаження.

Однією з головних переваг сучасної плазмової обробки є екологічна безпека. Обробка здійснюється в маловодневому або безводневому газовому середовищі, тому повністю відсутня загроза пожежі та вибуху. Крім того, процес проводять у вакуумній камері, що не вимагає вжиття спеціальних заходів проти забруднення навколишнього середовища. Тому плазмова хіміко-термічна обробка – це екологічно чистий, ресурсо- та енергозберігаючий, тобто економічно вигідний процес [26].

Плазмова хіміко-термічна обробка включає в себе кілька основних взаємопов'язаних процесів, які можна представити у вигляді окремих стадій:

1- отримання активних частинок, тобто дисоціація та іонізація насичуючого елемента в результаті перетворень у газовій фазі;

2- доставка активізованих частинок до поверхні оброблюваного металу (зовнішній масоперенос);

3- скупчення атомів і іонів насичуючого елемента на поверхні металу (адсорбція), електронна взаємодія цих іонів з металом (хемосорбція) і впровадження їх в метал (абсорбція), тобто масоперенос на межі метал – газове середовище;

4- переміщення впроваджених атомів та іонів від поверхні вглиб металу (дифузія), тобто внутрішній масоперенос, який можливий тільки за умови розчинності дифундуючого елемента в металі [27].

Процеси, що протікають на перерахованих стадіях, взаємопов'язані і комплексно впливають на ефективність хіміко-термічної обробки. Найскладніші з них, які важко піддаються дослідженню, протікають на поверхні металу при його взаємодії з дисоційованою та іонізованою газовою фазою. Однак саме вони визначають формування високого градієнта концентрацій насичуючого елемента, що забезпечує високу інтенсивність обробки. Швидкість і механізм адсорбції та інших видів сорбції визначаються властивостями газової плазми, у складі якої знаходяться робочі частинки [28].

У процесі хіміко-термічної обробки для управління структурою та механічними властивостями одержуваного поверхневого шару оброблюваних деталей підтримуються та контролюються такі основні параметри процесу обробки:

1) склад газового середовища, тобто концентрація в ній газів, що містять насичуючі елементи (азот, вуглець тощо), а також водень і, можливо, інші гази;

2) температура обробки;

3) тривалість процесу обробки;

4) робочий тиск газів у реакторі;

5) основні параметри розряду, що створює плазму;

6) ступінь дисоціації та іонізації робочих газів;

7) енергія іонів та щільність іонного струму на поверхні деталі.

В роботі [29] показано, чим більша температура азотування, тим більша

концентрація азоту в азотованому шарі та його товщина. При цьому твердість сталі може при високих температурах знижуватися через розкладання твердих вищих нітридів заліза.

**Методика дослідження.** За першою технологією з проведенням глибокого іонно-плазмового азотування були виготовлені експандери трубопресової установки зусиллям 16 МН у кількості 3 (трьох) штук зі сталі 4Х4ВМФС діаметром 120 мм і довжиною 195 мм. Була проведена іонно-плазмова обробка протягом 1–2 годин при 480–540 °С, що забезпечує процеси азотування на поверхні зразків. Далі експандери поміщають в шахтну піч, поступово нагрівають за технологією попереднього нагріву до  $\approx 900\text{--}950$  °С, витримують, а подальший нагрів здійснюють в розплавлених солях до температури загартування  $\approx 1080\text{--}1100$  °С, витримують, здійснюють охолодження в полімерному середовищі і піддають відпусканню, при цьому перший відпуск здійснюють при температурі не вище 240–250 °С, другий відпуск за температур не вище 350–380 °С, а фінішний відпуск здійснюють за температури не вище 580 °С.

Після цього проводять механічну обробку виробів, тобто видаляють припуск разом з дефектним окисленим шаром (окалиною) і отримують чистові розміри інструменту. При цьому усуваються також відхилення від геометричних розмірів (повідки або жолоблення), які зазвичай мають місце при термічній обробці виробів складної форми. Найбільш надійну оцінку результатів хіміко-термічної обробки дають металографічні дослідження, які дозволяють отримати відомості про товщину і будову отриманого поверхневого шару на поверхні деталей. Зазвичай для металографічного дослідження шліфи труїли ніталем – 2–4%-м спиртовим розчином азотної кислоти. Також були проведені металографічні дослідження шліфів з використанням мікроскопу Ахіоvert 200 МАТ, замір твердості поверхні зразків після ХТО був виконаний за допомогою мікротвердоміра (мікроскопа) – типу ПМТ-3 при навантаженні 100 Гс, а також із застосуванням портативного електронного ультразвукового твердоміру (типу «Ультракон») [30].

Отримані результати наведені в таблицях 2, 3.

Таблиця 2

## Режими хіміко-термічної обробки дослідних зразків

Режим обробки	Температура азотування, °С	Температура загартування, °С	Температура відпуску, °С	Твердість, HV <sub>0,1</sub>
1 – за поширеною технологією	530–550	1 050–1 070	320–350	980–1 020

Таблиця 3

## Режими хіміко-термічної обробки дослідних зразків

Марка сталі	Обробка	HV <sub>0,1</sub>
4Х4ВМФС	іонне азотування + загартування з трьохкратним відпуском(1)	1 045, 1 055, 1 030
4Х4ВМФС	іонне азотування + загартування з трьохкратним відпуском(2)	1 030, 1 035, 1 045

Графік термічної обробки експандерів трубопрофільних пресів з використанням

глибокого іонного азотування показаний на рисунку 9.

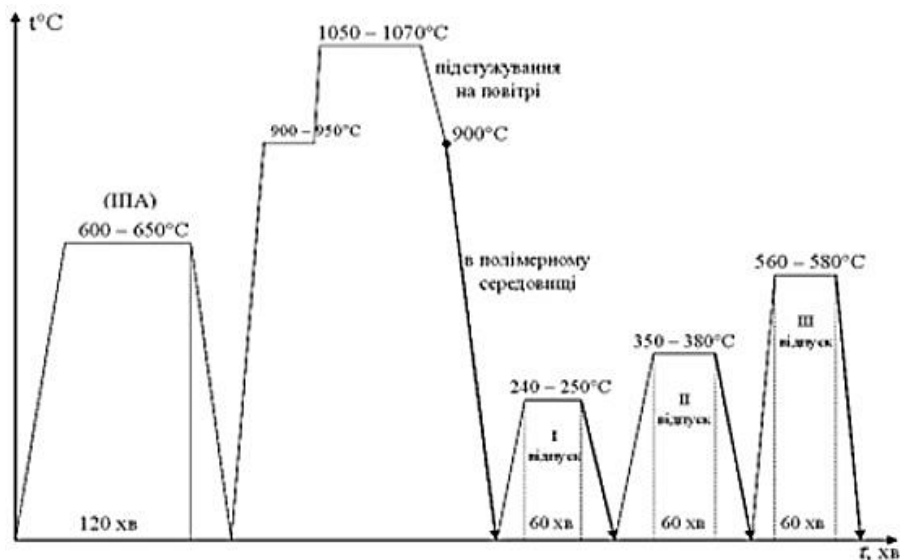


Рис. 9. Графік термічної обробки експандерів трубопрофільних пресів з використанням глибокого іонного азотування

По другій технології на випробування були надані експандери трубопресової установки зусиллям 16 МН у кількості 3 (трьох) штук: зі сталі 4Х4ВМФС діаметром 120 мм і довжиною 195 мм. Експандери піддані загартуванню з трьохкратним відпуском для зміцнення, а далі іонному азотуванню в плазмі ДВДР на установці «Булат-6» лабораторії плазмових технологій

ННЦ ХФТІ (м. Харків), яке поєднане з третім відпуском інструменту. Після проведення термічної обробки на всіх зразках проводили заміри твердості із застосуванням портативного електронного ультразвукового твердоміру (типу «Ультракон») і мікротвердоміру ПМТ-3. Отримані результати наведені в таблицях 4, 5.

Таблиця 4

**Режими хіміко-термічної обробки дослідних зразків**

Режим обробки	Температура відпуску, °С		Температура азотування, °С	Твердість, НV <sub>0,1</sub>
	I	II		
1 – за поширеною технологією	560–580	550–560	530–550	985–1 015

Таблиця 5

**Режими хіміко-термічної обробки дослідних зразків**

Марка сталі	Обробка	НV <sub>0,1</sub>
4Х4ВМФС	загартування з відпуском(1) + іонне азотування (2)	1 045, 1 053, 1 033
4Х4ВМФС	загартування з відпуском(1) + іонне азотування (2)	1 030, 1 035, 1 045

Результати апробації запропонованого способу хіміко-термічної обробки трубопресового інструменту зі штампових сталей свідчать, що за рахунок зміцнення матриці та проведення іонного азотування відбувається значне підвищення твердості поверхневих шарів інструменту, яке з властивостями матриці буде сприяти покращенню експлуатаційної стійкості

трубопресового інструменту, призначеного для виготовлення труб, що виготовляються шляхом гарячого пресування. Це дозволить підвищити твердість поверхневого шару та матриці і тим самим збільшити експлуатаційну стійкість трубного інструменту на 20–30 %, а також знизити витрати при виготовленні труб з легованих марок сталей [31-32].

За третьою технологією експандери трубопресової установки зусиллям 16 МН у кількості 3 (трьох) штук: зі сталі 4Х4ВМФС діаметром 120 мм і довжиною 195 мм піддані загартуванню з трьохкратним відпуском для зміцнення, а третій відпуск поєднаний з іонним азотуванням в плазмі ДВДР на установці «Булат-6» лабораторії плазмових

технологій ННЦ ХФТІ (м. Харків). Після проведення термічної обробки на всіх зразках проводили заміри твердості із застосуванням портативного електронного ультразвукового твердоміру (типу «Ультракон») і мікротвердоміру ПМТ-3.

Отримані результати наведені в таблицях 6, 7.

Таблиця 6

**Режими зміцнення трубопресового інструменту зі штампових сталей з проведенням іонного азотування дослідних зразків**

Режим обробки	Температура відпуску, °С		Температура азотування, °С	Твердість, HV <sub>0,1</sub>
	I	II		
1 – за поширеною технологією	560–580	550–560	530–550	985–1 015

Таблиця 7

**Режими зміцнення трубопресового інструменту зі штампових сталей з проведенням іонного азотування дослідних зразків**

Марка сталі	Обробка	HV <sub>0,1</sub>
4Х4ВМФС	загартування з відпуском(1) + іонне азотування (2)	1 040, 1 050, 1 030
4Х4ВМФС	загартування з відпуском(1) + іонне азотування (2)	1 045, 1 055, 1 050

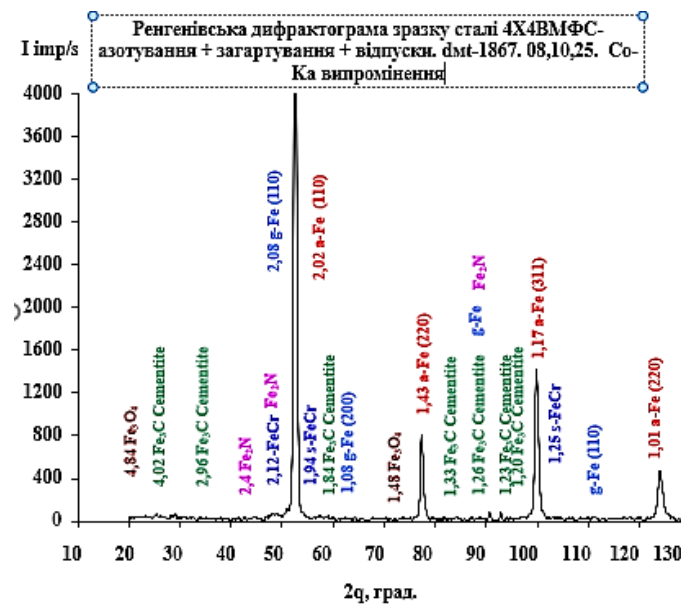


Рис. 10. Дифрактограма поверхні зразку зі сталі 4Х4ВМФС

Рентгенофазовий аналіз проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 у монохроматизованому Со – Ка випромінюванні ( $\lambda = 1,7902\text{Å}$ ). Ідентифікація сполук (фаз) проводили шляхом порівняння міжплощинних відстаней ( $d, \text{Å}$ ) та відносних інтенсивностей ( $I_{\text{отн}} - I_{110}$ ) експериментальної кривої з даними електронної картотеки PCPDFWIN. Зйомка

проводилась на кутах 10–90 град. Фазовий аналіз – крок 0,1 град. Тривалість 5 с. Структурний аналіз – крок 0,01 град. Тривалість 5 с [26].

Дифрактограма поверхні зразку після глибокого азотування, загартування і відпусків наведена на рисунку 10.

Аналіз фазового складу показав, що в початковому стані виявляється однофазний

структурний стан на основі фази  $\alpha$ -Fe, при іонно-плазмовому азотуванні відбувається формування тільки 2 фаз – Fe<sub>4</sub>N і Fe<sub>3</sub>N. Утворення більш крихкої фази Fe<sub>2</sub>N в

протилежність газового азотування в цьому випадку не відбувається. Фазовий склад сталі показаний на рисунку 11, елементарний склад на рисунку 12.

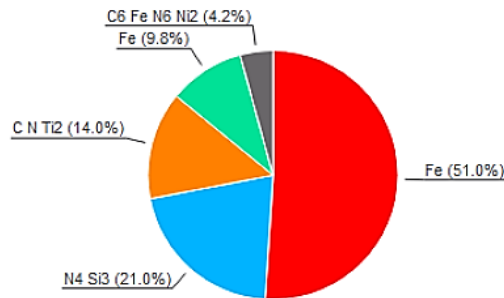


Рис. 11. Фазовий склад сталі 4X4VMFC після азотування і послідууючого термозміцнення

Elemental composition (Weight %) calc. by RIR method

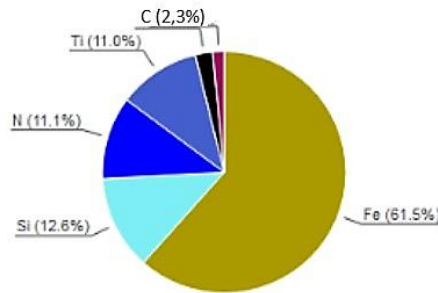


Рис. 12. Елементарний склад сталі 4X4VMFC після азотування і послідууючого термозміцнення

Таблиця 8

**Результати заміру мікротвердості зразків сталі 4X4VMFC після глибокого іонного азотування, загартування і відпуску**

№ зразку	Зона відстань від поверхні	Діаметр відбитка мкм	Середній діаметр відбитка, мкм	Навантаження Г	Значення мікротвердості МПа	Середнє значення мікротвердості, МПа	Середнє значення мікротвердості, Кг/мм <sup>2</sup>
4	20	15	15,154	100	8 500		
5	20	15	15,014	100	8 400	8 450	845
9	40	16	16,046	100	7 500	7 500	750
10	50	17	17,664	100	6 900		
11	50	17	17,564	100	6 950	6 925	692,5
13	70	16	16,74	100	6 200	6 200	620
14	80	18	18,64	100	6 100	6 100	610
15	150	19	18,74	100	5 800	5 800	580

Результати вимірювання твердості експандерів по глибині наведені в таблиці 8.

В заводських умовах традиційна технологія термозміцнення експандерів представляє собою загартування з наступним

дво- або трикратним відпуском для отримання твердості 48–52 HRC. Запропоновані технології термозміцнення включають проведення іонно-плазмового азотування перед загартуванням з

відпусками (глибоке азотування на глибину 1,5–2 мм), після загартування з відпусками (на глибину 50–70 мкм). Це підвищує стійкість експандерів з 100 до 120–140 пресовок в залежності від технології. Це дозволить значно підвищити твердість поверхневого шару і тим самим збільшити

стійкість трубного інструменту на 25–30 % та знизити витрати по переробці виготовлення труб.

Випробування інструменту після зміцнюючої обробки виконано на пресовій дільниці ТОВ «ВО ОСКАР» (м. Дніпро) (рис. 13).



Рис. 13. Випробування трубного інструменту на ТОВ «ВО ОСКАР» (м. Дніпро)

Мета випробування: оцінити доцільність проведення різних технологій термозміцнення експандерів з використанням іонно-плазмового азотування з метою покращення їх експлуатаційної стійкості, твердості, теплостійкості, витривалості.

### Висновки

Запропоновані технології зміцнення трубопресового інструменту з використанням іонно-плазмового азотування дають можливість збільшити ресурс роботи трубопресового інструменту. Для експандерів трубопрофільного пресу з сталі 4Х4ВМФС після реалізації комплексної обробки з використанням глибокого ПА, комплексних обробок з використанням загартування, відпусків при різних температурах і наступного азотування значно на 25–30 % збільшує експлуатаційні властивості інструменту і термін його експлуатації, а також якість його поверхні,

що значно збільшує якість внутрішньої поверхні труб з високолегованих сталей.

Для експандерів з сталі 4Х4ВМФС після глибокого іонного азотування, загартування з багаторазовими відпусками, твердість поверхневого шару підвищилась до рівня 9500–10000 МПа, а експлуатаційна стійкість інструменту збільшилася в 1,5–2 рази, що забезпечується утворенням на поверхні інструменту зміцненого шару, який складається з нітридної зони Fe<sub>2</sub>-zN ( $\epsilon$ -фаза) і Fe<sub>4</sub>N ( $\gamma^1$ -фаза) і підшару азотистого фериту ( $\alpha$ -фаза), в якому при охолодженні виділяються нітриди хрому, молібдену, ванадію, що підтвердили результати досліджень та випробування механічних властивостей і результати промислової апробації інструменту.

*Результати досліджень отримані при фінансовій підтримці Національного фонду досліджень України у межах проєкту (реєстраційний номер 2025.06/0084)*

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Логинов Ю. Н., Игнатович Ю. В. Инструмент для прессования металлов : учеб. пос. 2014. 224 с.
2. Беляев С. В., Довженко И. Н., Соколов Р. Е., Рудницкий Э. А., Пещанский А. С. Конспект лекций по технологии прессования. 2007.
3. Гавриленко О. В. Основы технологии производства труб методом горячего пресования : навч. посіб. Харків: ХНАДУ, 2017. 144 с.

4. Кузьмич В. О., Косенко В. М., Бузенко Л. В. Технологія виробництва сталевих труб методом гарячого пресування : підруч. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 224 с.
5. Підкова О. В., Головня В. В., Лозицький В. М. Технологія виготовлення труб зі спеціальними властивостями : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 320 с.
6. Кузьмич В. О., Косенко В. М., Бузенко Л. В. Технологія виробництва сталевих труб методом гарячого пресування : підруч. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 224 с.
7. Петров В. О., Шинкаренко О. В. Виробництво труб шляхом гарячого пресування: підручник. Київ : Наукова думка, 2017. 320 с.
8. Головань В. В., Сергієнко А. О., Приходько І. О. Технологія виробництва труб методом гарячого пресування : навч. посіб. Кривий Ріг : КНТУ, 2014. 188 с.
9. Риженкова О. М., Чуйко В. С. Виробництво труб за технологією гарячого пресування : навч. посіб. Київ : Національний металургійний університет України, 2014. 200 с
10. Афтанділянц Є. Г., Зазимко Є. В., Лопатько К. Г. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підруч. Київ : НАУ, 2008. 234 с.
11. Косенко В. А., Кадомський С. В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство : підруч. Київ : Університет «Україна», 2012. 267 с.
12. Більченко О. В., Дудка О. І., Лобода П. І. Матеріалознавство : навч. посіб. Київ : Кондор, 2009. 154 с.
13. Боброва Т. Б., Високок С. М., Глушко Ю. Ю., Пеховка М. В. та ін. Матеріалознавство : навч. посіб. Київ : Ресурсний центр «Гурт», 2019. 167 с.
14. Andrea Szilagyine Biro. Trends of nitriding processes. *Production Processes and Systems*. 2013. Vol. 6, № 1. Pp. 57–66.
15. Axinte Mihai, Nejeru Carmen, Perju Manuela Cristina, Cimpoeu Nicanor, Hopulele Ion. Research on hollow cathode effect and edge effect avoidance in plasma nitriding treatment. *Tehnomus New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*. 2011. № 18. Suceava. Pp. 181–184.
16. Yao S. H. Evaluation of TiN/AlN nano-multilayer coatings on drills used for micro-drilling. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 197. Pp. 351–357.
17. Куликов І. В. Вплив технологічних факторів на якість труб, отриманих методом гарячого пресування : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01. Харків : Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2011. 197 с.
18. Кривчик Л. С., Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Панченко А. В., Тараненко А. О. Особливості хіміко-термічної обробки трубопресового інструменту з вітчизняних і зарубіжних сталей з метою їх зміцнення для роботи в важких умовах експлуатації. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід : VIII Міжнар. конф.* 2025. ISBN 978–617–8737–45–0.
19. Пінчук В. Л., Кривчик Л. С., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О. Особливості глибокого іонно-плазмового азотування інструменту з штампових сталей для виробництва корозійностійких труб. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. Вип. 39. ISSN 2522-9117 (print), ISSN 2786-6149 (online). DOI: 10.52150/2522-9117-2025-39.
20. Кривчик Л. С., Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Князев С. А. Використання різноманітних режимів іонно-плазмового азотування штампових сталей для виготовлення трубопресового інструменту для пресування труб з високолегованих сталей. *Proceedings of III International Scientific and Practical Conference*. Vancouver, Canada, 2025. ISBN 978–1–4879–3796–6.
21. Кривчик Л. С., Пінчук В. Л., Хохлова Т. С. Шляхи зміцнення трубопресового інструменту для виробництва корозійностійких труб з метою покращення його експлуатаційних характеристик. *Theory and practice of science : key aspects*. Рим, Італія, 2021. С. 349–371.
22. Матвієнко І. І. Технологія хіміко-термічної обробки сталей. Київ : Вища школа, 2003. 416 с.
23. Павленко Р. М. Технологія хіміко-термічної обробки металів : навч. посіб. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2014. 319 с.
24. Азаренков С. І., Бойко Л. В., Боровик В. В. та ін. Хіміко-термічна обробка сталей : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2015.
25. Пінчук В. Л., Кривчик Л. С., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О. Комбіновані режими іонно-плазмового азотування трубного інструменту з метою покращення його експлуатаційних властивостей. *Science and technology : challenges, prospects and innovations*. Осака, Японія, 2024.
26. Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Кривчик Л. С., Панченко А. В. Сучасні тенденції у розвитку технологій термічної та хіміко-термічної обробки трубного інструменту. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід : VII міжнар. конф.* Дніпро, 2024.
27. Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Романова Н. С., Кривчик Л. С., Мачула Н. В. Формування азотованого шару сталі 5Х3В3МФС, отриманого в газоплазмовому двоступеневому вакуумно-дуговому розряді. *Теорія і практика металургії*. 2023. № 3. ISSN 1028-2335.
28. Andreyev A. O., Pavlenko V. M., Sisoyev Yu. O. Technology of mechanical engineering. Basics of vacuum-arc coatings : a textbook. Kharkiv : National Aerospace untitled M.Ye. Zhukovsky, Kharkiv. aviator in-t, 2018. 288 p.

29. Andreyev A. A., Sablev L. P., Grigorev S. N. Vacuum arc coating. Kharkiv : NNC HFTI, 2010. 318 p.
30. Андреев А. О., Жиров О. С., Соболев О. В., Столбовий В. О. та ін. Патент України 117008U C23C 14/32 на корисну модель. Спосіб хіміко-термічної обробки сталевих виробів. Бюл. № 11 від 12.06.2017.
31. Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Андреев А. О., Кривчик Л. С., Шпортько Ю. В. С21D 9/22 (2006.01) C23C 8/24 (2006.01). Патент на корисну модель № 162019. Спосіб хіміко-термічної обробки трубопресового інструмента зі штампових сталей (Україна).
32. Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Андреев А. О., Кривчик Л. С. С21D 9/22 (2006/01) C23C 8/24 (2006/01). Патент на корисну модель № 161979. Спосіб хіміко-термічної обробки трубопресового інструмента зі штампових сталей з проведенням глибокого іонного азотування (Україна).

## REFERENCES

1. Loginov Y.N. and Ignatovich Y.V. Tool for pressing metals : tutorial. 2014, 224 p. (in Russian).
2. Belyaev S.V., Dovzhenko I.N., Sokolov R.E., Rudnitsky E.A. and Peshchansky A.S. Lecture notes on pressing technology. 2007. (in Russian).
3. Gavrilenko O.V. *Osnovy tekhnolohiyi vyrobnystva trub metodom haryachoho presuvannya : navchal'nyy posibnyk* [Fundamentals of technology for producing pipes by hot pressing : a textbook]. Kharkiv : KhNADU, 2017, 144 p. (in Ukrainian).
4. Kuzmich V.O., Kosenko V.M. and Buzenko L.V. *Tekhnolohiya vyrobnystva stalevykh trub metodom haryachoho presuvannya : pidruchnyk* [Technology for producing steel pipes by hot pressing : a textbook]. Kyiv : NTUU “KPI”, 2011, 224 p. (in Ukrainian).
5. Pidkova O.V., Golovnya V.V. and Lozytsky V.M. *Tekhnolohiya vyhotovlennya trub zi spetsial'nymy vlastyvostyamy : navchal'nyy posibnyk* [Technology of production of pipes with special properties : a textbook]. Kyiv : Center of Educational Literature, 2008, 320 p. (in Ukrainian).
6. Kuzmich V.O., Kosenko V.M. and Buzenko L.V. *Tekhnolohiya vyrobnystva stalevykh trub metodom haryachoho presuvannya : pidruchnyk* [Technology of production of steel pipes by hot pressing : a textbook]. Kyiv : NTUU “KPI”, 2011, 224 p. (in Ukrainian).
7. Petrov V.O. and Shynkarenko O.V. *Vyrobnystvo trub shlyakhom haryachoho presuvannya : pidruchnyk* [Production of pipes by hot pressing : a textbook]. Kyiv : Naukova Dumka, 2017, 320 p. (in Ukrainian).
8. Golovan V.V., Sergienko A.O. and Prykhodko I.O. *Tekhnolohiya vyrobnystva trub metodom haryachoho presuvannya : navchal'nyy posibnyk* [Technology of production of pipes by hot pressing : a textbook]. Kryvyi Rih : KNTU, 2014, 188 p. (in Ukrainian).
9. Ryzhenkova O.M. and Chuyko V.S. *Vyrobnystvo trub za tekhnolohiyeyu haryachoho presuvannya : navch. posib.* [Pipe production using hot pressing technology : a textbook]. Kyiv : National Metallurgical University of Ukraine, 2014, 200 p. (in Ukrainian).
10. Aftandylyants E.G., Zazimko E.V. and Lopatko K.G. *Tekhnolohiya konstruksiynykh materialiv i materialoznavstvo : pidruchnyk* [Technology of structural materials and materials science : a textbook]. Kyiv : NAU, 2008, 234 p. (in Ukrainian).
11. Kosenko V.A. and Kadomsky S.V. *Tekhnolohiya konstruksiynykh materialiv ta materialoznavstvo : pidruchnyk* [Technology of structural materials and materials science : a textbook]. Kyiv : University “Ukraine”, 2012, 267 p. (in Ukrainian).
12. Bilchenko O.V., Dudka O.I. and Loboda P.I. *Materialoznavstvo : navchal'nyy posibnyk* [Materials Science : a textbook]. Kyiv : Condor Publ., 2009, 154 p. (in Ukrainian).
13. Bobrova T.B., Vysokos S.M., Glushko Y.Yu., Pekhovka M.V. and oth. *Materialoznavstvo : navchal'nyy posibnyk* [Materials Science : a textbook]. Kyiv : Resource Center “Gurt”, 2019, 167 p. (in Ukrainian).
14. Andrea Szilagyine Biro. Trends of nitriding processes. Production Processes and Systems. 2013, vol. 6, no. 1, pp. 57–66.
15. Axinte Mihai, Nejneru Carmen, Perju Manuela Cristina, Cimpoeu Nicanor and Hopulele Ion. Research on hollow cathode effect and edge effect avoidance in plasma nitriding treatment. Tehnomus New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies. No.18, Suceava, 2011, pp. 181–184.
16. Yao S.H. Evaluation of TiN/AlN nano-multilayer coatings on drills used for micro-drilling. Surface and Coatings Technology. 2005, vol. 197, pp. 351–357.
17. Kulikov I.V. *Vplyv tekhnolohichnykh faktoriv na yakist' trub, otrymanykh metodom haryachoho presuvannya : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.16.01.* [The influence of technological factors on the quality of pipes obtained by hot pressing : dissertation ... candidate of technical sciences : 05.16.01.]. Kharkiv : Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, 2011, 197 p. (in Ukrainian).
18. Kryvchyk L.S., Pinchuk V.L., Deineko L.M., Panchenko A.V. and Taranenko A.O. *Osoblyvosti khimiko-termichnoyi obrobky trubopresovoho instrumentu z vitchyznyanykh i zarubizhnykh staley z metoyu yikh zmitsnennya dlya roboty v vazhkykh umovakh ekspluatatsiyi* [Features of chemical-thermal treatment of pipe-pressing tools from domestic and foreign steels for their strengthening for work in difficult operating conditions]. *Innovatsiyi tekhnolohiyi v nautsi ta*

osviti. *Yevropeys'kyi dosvid : VIII Mizhnarodna konferentsiya* [Innovative Technologies in Science and Education. European Experience : VIII International Conference]. 2025, ISBN 978-617-8737-45-0. (in Ukrainian).

19. Pinchuk V.L., Kryvchuk L.S., Deineko L.M. and Stolbovyi V.O. *Osoblyvosti hlybokoho ionno-plazmenoho azotuvannya instrumentu z shtampovykh staley dlya vyrobnytstva koroziiystykykh trub* [Features of deep ion-plasma nitriding of tools made of die steels for the production of corrosion-resistant pipes]. *Fundamental'ni ta prykladni problemy chornoyi metalurhiyi* [Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy]. Iss. 39, ISSN 2522-9117 (print), ISSN 2786-6149 (online). DOI: 10.52150/2522-9117-2025-39. (in Ukrainian).

20. Kryvchuk L.S., Pinchuk V.L., Deyneko L.M., Stolbovyi V.O. and Knyazev S.A. *Vykorystannya riznomanitnykh rezhymiv ionno-plazmenoho azotuvannya shtampovykh staley dlya vyhotovlennya trubopresovoho instrumentu dlya presuvannya trub z vysokolehovanykh staley* [Use of various modes of ion-plasma nitriding of die steels for the manufacture of pipe pressing tools for pressing pipes made of high-alloy steels]. Proceedings of III International Scientific and Practical Conference. Vancouver, Canada, 2025, ISBN 978-1-4879-3796-6. (in Ukrainian).

21. Kryvchuk L.S., Pinchuk V.L. and Khokhlova T.S. *Shlyakhy zmitsnennya trubopresovoho instrumentu dlya vyrobnytstva koroziiystykykh trub z metoyu pokrashchennya yoho ekspluatatsiynykh kharakterystyk* [Ways to strengthen the pipe pressing tool for the production of corrosion-resistant pipes in order to improve its operational characteristics]. Theory and Practice of Science : Key Aspects. Rome, Italy, 2021, pp. 349-371. (in Ukrainian).

22. Matvienko I.I. *Tekhnolohiya khimiko-termichnoyi obrobky staley* [Technology of chemical-thermal treatment of steels]. Kyiv : Higher School, 2003, 416 p. (in Ukrainian).

23. Pavlenko R.M. *Tekhnolohiya khimiko-termichnoyi obrobky metaliv : navchal'nyy posibnyk* [Technology of chemical-thermal treatment of metals : a textbook]. Kyiv : VPC "Kyiv University", 2014, 319 p. (in Ukrainian).

24. Azarenkov S.I., Boyko L.V., Borovik V.V. et al. *Khimiko-termichna obrobka staley : navchal'nyy posibnyk* [Chemical-thermal treatment of steels : a textbook]. Kyiv : NTUU "KPI", 2015. (in Ukrainian).

25. Pinchuk V.L., Kryvchuk L.S., Deineko L.M. and Stolbovyi V.O. *Kombinovani rezhymy ionno-plazmenoho azotuvannya trubnoho instrumentu z metoyu pokrashchennya yoho ekspluatatsiynykh vlastyvostey* [Combined modes of ion-plasma nitriding of tubular tools to improve their operational properties]. Science and Technology : Challenges, Prospects and Innovations. 2024, Osaka, Japan. (in Ukrainian).

26. Pinchuk V.L., Deineko L.M., Stolbovy V.O., Kryvchuk L.S. and Panchenko A.V. *Suchasni tendentsiyi u rozvytku tekhnolohiy termichnoyi ta khimiko-termichnoyi obrobky trubnoho instrumentu* [Modern trends in the development of technologies for thermal and chemical-thermal treatment of pipe instruments]. Innovative Technologies in Science and Education. European Experience. 2024, Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian).

27. Pinchuk V.L., Deineko L.M., Stolbovy V.O., Romanova N.S., Kryvchuk L.S. and Machula N.V. *Formuvannya azotovanoho sharu stali 5KH3V3MFS, otrymano v hazoplazmovomu dvostupenevomu vakuumno-duhovomu rozryadi* [Formation of a nitrided layer of 5Kh3V3MFS steel obtained in a gas-plasma two-stage vacuum-arc discharge]. *Teoriya i praktyka metalurhiyi* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2023, no. 3, ISSN 1028-2335. (in Ukrainian).

28. Andreyev A.O., Pavlenko V.M. and Sisoyev Yu.O. *Tehnologiya mashinobuduvannya. Osnovi otrimannya vakuumno-dugovih pokryt'iv : pidruchnik* [Technology of mechanical engineering. Basics of vacuum-arc coatings : a textbook]. Kharkiv : National Aerospace untitled M.Ye. Zhukovsky, Kharkiv. aviator in-t, 2018, 288 p. (in Ukrainian).

29. Andreyev A.A., Sablev L.P. and Grigorev S.N. *Vakuumno-dugovye pokrytiya* [Vacuum arc coating]. Kharkiv : NNC HFTI, 2010, 318 p. (in Russian).

30. Andreyev A.O., Jirov O.S., Sobol' O.V., Stolbovyi V.O. and oth. *Patent Ukraine 117008U C23C 1432 na korisnu model. Sposib khimiko-termichnoi obrobki stalevih virobiv* [Patent of Ukraine 117008U C23C 14\32 on the utility model. Method of chemical and thermal treatment of steel products]. Byul. no. 11 from 12.06.2017, 2017. (in Ukrainian).

31. Pinchuk V.L., Deineko L.M., Stolbovy V.O., Andreyev A.O., Kryvchuk L.S. and Shportko Y.V. *C21D 9/22 (2006.01) C23C 8/24 (2006.01). Patent na korysnu model' № 162019. Sposib khimiko-termichnoyi obrobky trubopresovoho instrumenta zi shtampovykh staley* [C21D 9/22 (2006.01) C23C 8/24 (2006.01). Utility model patent no. 162019. Method of chemical and thermal treatment of pipe pressing tools made of die steels]. Ukraine. (in Ukrainian).

32. Pinchuk V.L., Deineko L.M., Stolbovy V.O., Andreev A.O. and Kryvchuk L.S. *C21D 9/22 (2006/01) C23C 8/24 (2006/01). Patent na korysnu model' № 161979. Sposib khimiko-termichnoyi obrobky trubopresovoho instrumenta zi shtampovykh staley z provedennyam hlybokoho ionnoho azotuvannya* [C21D 9/22 (2006/01) C23C 8/24 (2006/01). Utility model patent no. 161979. Method of chemical-thermal treatment of pipe pressing tools made of die steels with deep ion nitriding]. Ukraine. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 18.03.2026.

Прийнято після рецензування: 15.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 614.841

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.88.1245

## ПРОБЛЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ЗА НАЯВНОСТІ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

КОВАЛИШИН В. В.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
МАРИЧ В. М.<sup>2\*</sup>, *докторант, канд. техн. наук, доц.*,  
ФІРМАН В. М.<sup>3</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
ГАМАН Б. В.<sup>4</sup>, *курсант*

<sup>1</sup> Кафедра експлуатації транспортних засобів та аварійно-рятувальних робіт, ННІ пожежної та техногенної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, 79007, Львів, Україна, тел. +38 (067) 673-57-47, e-mail: [kovalyshyn.v@gmail.com](mailto:kovalyshyn.v@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230>

<sup>2\*</sup> Кафедра експлуатації транспортних засобів та аварійно-рятувальних робіт, ННІ пожежної та техногенної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, 79007, Львів, Україна, тел. +38 (068) 649-08-58, e-mail: [marychvolodj@ukr.net](mailto:marychvolodj@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>

<sup>3</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Львівський національний університет ім. Івана Франка, вул. Дорошенка, 41, 79000, Львів, Україна, тел. +38 (067) 785-50-49, e-mail: [yfirman@ukr.net](mailto:yfirman@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>

<sup>4</sup> Кафедра превентивної діяльності у сфері пожежної та техногенної безпеки, ННІ пожежної та техногенної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, 79007, Львів, Україна, тел. +38 (098) 008-43-13, e-mail: [gamanbohndan2005@gmail.com](mailto:gamanbohndan2005@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0549-8373>

**Анотація. Постановка проблеми.** Стрімке поширення літій-іонних акумуляторів у побуті, транспорті, енергетичних системах і цифрових технологіях зумовлює зростання кількості пожеж нового типу, що характеризуються високою температурою горіння, виділенням токсичних речовин і ризиком повторного займання. Особливу небезпеку становить явище теплового розгону, яке ускладнює локалізацію та ліквідацію пожеж і створює додаткові ризики для населення та рятувальників. **Мета статті.** Аналіз причин виникнення пожеж за участю літій-іонних акумуляторів, дослідження механізмів розвитку теплового розгону та визначення особливостей гасіння таких пожеж, а також узагальнення результатів сучасних наукових досліджень щодо ефективності різних вогнегасних засобів і способів їх ліквідації. **Основні результати дослідження.** Встановлено, що основними причинами пожеж є перегрів, перезаряд, механічні пошкодження та внутрішні короткі замикання. Визначено, що ключовим фактором розвитку пожеж є тепловий розгін, який супроводжується інтенсивним виділенням тепла та горючих газів. Доведено, що традиційні засоби пожежогасіння (порошкові та газові) мають обмежену ефективність, тоді як найбільш результативним є інтенсивне охолодження водою або використання водяного туману. Виявлено основні труднощі гасіння, зокрема ризик повторного займання, поширення вогню між елементами батареї та складність доступу до осередку горіння. **Висновок.** Обґрунтовано необхідність удосконалення тактики гасіння пожеж за участю літій-іонних акумуляторів із акцентом на охолоджувальні методи. Запропоновано розроблення спеціалізованих вогнегасних речовин і технічних засобів, впровадження систем раннього виявлення теплового розгону, а також підвищення рівня підготовки рятувальників і обізнаності населення щодо безпечної експлуатації акумуляторів. Вирішення проблеми потребує комплексного підходу, що поєднує наукові дослідження, нормативне вдосконалення та практичні заходи безпеки.

**Ключові слова:** *пожежна небезпека; літій-іонні акумулятори; гасіння пожеж; вогнегасні речовини; безпека праці*

## PROBLEMS OF FIRE EXTINGUISHING IN THE PRESENCE OF LITHIUM-ION BATTERIES

KOVALYSHYN V.V.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
MARYCH V.M.<sup>2\*</sup>, *Doctoral Stud., Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
FIRMAN V.M.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
HAMAN B.V.<sup>4\*</sup>, *Cadet*

<sup>1</sup> Department of Vehicle Operations and Emergency Rescue Operations, ESI of Fire and Technological Safety, Lviv State University of Life Safety, 35, Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine, tel. +38 (067) 673-57-47, e-mail: [kovalyshyn.v@gmail.com](mailto:kovalyshyn.v@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230>

<sup>2\*</sup> Department of Vehicle Operations and Emergency Rescue Operations, ESI of Fire and Technological Safety, Lviv State University of Life Safety, 35, Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine, tel. +38 (068) 649-08-58, e-mail: [marychvolodj@ukr.net](mailto:marychvolodj@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>

<sup>3</sup> Department of Life Safety, Ivan Franko National University of Lviv, 41, Doroshenka St., Lviv, 79000, Ukraine, tel. +38 (067) 785-50-49, e-mail: [vfirman@ukr.net](mailto:vfirman@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-7051-4494>

<sup>4</sup> Department of Preventive Measures in Fire and Industrial Safety, Institute of Fire and Industrial Safety, Lviv State University of Life Safety, 35, Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine, tel. +38 (098) 008-43-13, e-mail: [gamanbohdan2005@gmail.com](mailto:gamanbohdan2005@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0549-8373>

**Abstract. Raising of the problem.** The rapid spread of lithium-ion batteries in everyday life, transportation, energy systems, and digital technologies leads to an increase in a new type of fires characterized by high combustion temperatures, the release of toxic substances, and the risk of re-ignition. A particular danger is posed by the phenomenon of thermal runaway, which complicates fire localization and suppression and creates additional risks for the population and emergency responders. **Purpose of the article.** Analyze the causes of fires involving lithium-ion batteries, to investigate the mechanisms of thermal runaway development, and to determine the specific features of extinguishing such fires, as well as to summarize the results of modern scientific research on the effectiveness of various extinguishing agents and methods. **Main results of the study.** It has been established that the main causes of fires are overheating, overcharging, mechanical damage, and internal short circuits. It is determined that the key factor in fire development is thermal runaway, which is accompanied by intense heat release and the emission of flammable gases. It is proven that traditional fire extinguishing agents (powder and gas-based) have limited effectiveness, while the most efficient method is intensive cooling with water or the use of water mist. The main challenges in fire suppression have been identified, including the risk of re-ignition, fire propagation between battery cells, and difficulty in accessing the fire source. **Conclusions.** The necessity of improving fire suppression tactics involving lithium-ion batteries with an emphasis on cooling methods has been substantiated. The development of specialized extinguishing agents and technical means is proposed, along with the implementation of early thermal runaway detection systems and the improvement of firefighter training and public awareness regarding the safe use of batteries. Solving this problem requires a comprehensive approach that combines scientific research, regulatory improvements, and practical safety measures.

**Keywords:** fire hazard; lithium-ion batteries; fire extinguishing; extinguishing agents; occupational safety

**Постановка проблеми.** Стрімке зростання використання літій-іонних акумуляторів у побутовій техніці, електронному обладнанні, інструментах, системах зберігання енергії та транспортних засобах (зокрема електромобілях, електросамокатах, електровелосипедах, дронах) суттєво підвищує ризик виникнення пожеж нового типу, що характеризуються специфічними механізмами розвитку та підвищеною небезпекою для людей і рятувальних підрозділів. Літій-іонні акумулятори відзначаються високою енергетичною щільністю, що за певних умов (механічні пошкодження, коротке замикання, перегрів, порушення режимів заряджання) може призводити до явища теплового розгону, інтенсивного виділення тепла, вибухонебезпечних газів та повторного займання.

Особливої актуальності проблема набуває в умовах зростання кількості електротранспорту та систем автономного енергоживлення. Пожежі за участю літій-іонних акумуляторів суттєво відрізняються від традиційних пожеж твердих або рідких

горючих речовин складністю локалізації, тривалістю горіння, ризиком повторного спалаху після видимого припинення горіння, а також необхідністю застосування значних обсягів води або спеціалізованих засобів пожежогасіння.

Проаналізуємо пожежі спричинені вибухом літій-іонних акумуляторів.

21 листопада 2025 р. виникла пожежа у м. Городок в одноповерховому складському приміщенні. Горіли літій-іонні батареї на площі 2100 м<sup>2</sup>. Врятовано 3 складських приміщення. До ліквідації пожежі було залучено 70 осіб та 19 одиниць пожежної та спеціальної техніки [1].

Уранці, 14 листопада 2022 р., у м. Київ в квартирі на дев'ятому поверсі вибухнув портативний акумулятор (повербанк), який заряджався від мережі. Під час вибуху та пожежі ніхто не постраждав, проте, житло та фасад багатоповерхівки зазнали значних пошкоджень. Під час евакуації, з верхніх поверхів врятовано 12 осіб, з них 3 дитини [2].

У ніч на 28 грудня 2022 р. у Львові сталося дві пожежі, в житлових багатоповерхових будинках, які були

спричинені загорянням літій-іонними акумуляторами та інвертором. Вибухом зруйновано три стіни у двох квартирах.

Постраждав один із власників квартири 30-річний чоловік який потрапив до лікарні з сильними опіками рук [3].

Вночі 2 липня 2024 р. у с. Городилець Ковельської громади вибухнув літій-іонний акумулятор, частково пошкодивши приміщення житлового будинку та електромережу. Рятувальники зазначають, що на території району зросла кількість пожеж внаслідок використання електрогенераторів та акумуляторів [4].

14 грудня 2024 р. у Львові сталася пожежа в підвальному приміщенні триповерхового житлового будинку. Причиною пожежі рятувальники назвали вибух літійового акумулятора, що спричинив загоряння речей у підвалі будинку. Ніхто не постраждав [5].

16 січня 2025 р. сталася пожежа на заводі компанії Vistra Energy (Каліфорнія США), що є одним із найбільших заводів із виробництва та зберігання акумуляторів у світі. Внаслідок пожежі в атмосферу викинулися клуби токсичного диму, що призвело до евакуації до 1500 осіб. Пожежа також сколихнула молоду індустрію акумуляторних батарейних накопичувачів [6].

27 вересня 2025 р. у Львові сталася пожежа, в квартирі у 10-поверхового будинку. Загоряння виникло через літійовий акумулятор електросамоката, який залишили заряджатися на ніч. Три людини постраждали – двоє дітей та дорослий. Діти отримали отруєння продуктами горіння і опіки, дорослий – опіки рук. Постраждалих госпіталізували [7].

У Львові 4 серпня 2025 р в готелі «Власта» виникла пожежа на 6 поверсі.

Під час пожежі усіх мешканців і працівників евакуювали. Госпіталізовано шестеро осіб, один чоловік отримав сильні опіки. Після локалізації пожежі виявлено залишки літій-іонної батареї, з електросамоката. Причина пожежі, вибух літій-іонної батареї електросамокату під час зарядки його в номері готелю [8].

6 листопада 2025 у м. Івано-Франківськ, в офісному приміщенні 3-поверховому

будинку стався вибух зарядної станції, що містила літій-іонні акумулятор. Внаслідок вибуху виникла пожежа на площі до ~20 м<sup>2</sup>, двоє людей отримали травми; понад 40 осіб евакуйовано з будівлі, працювали 25 рятувальників і 6 спецмашин [9].

8 березня 2026 року у вейп-шопі в Юніон-Корнер, (Шотландія) п'ятиповерховій будівлі, сталася велика пожежа, що призвело до часткового обвалення будівлі та серйозно порушило залізничне сполучення на станції, яка є найзавантаженішою в Шотландії. На місці події працювало понад 250 пожежників, які залишалися на місці події до 11 березня. Причина пожежі загоряння зарядної станції, до якої було підключено велику кількість зарядних пристроїв [10].

З аналізу пожеж, небезпекою загорання є залишення без нагляду ввімкненого акумулятора під час його підзарядки. Тому перед початком використання акумуляторів необхідно уважно прочитати інструкцію до них, а для їхнього безпечного встановлення – звертатися до фахівців і дотримуватися усіх правил безпеки, у жодному випадку їх не порушуючи.

Дані пожежі літій-іонних елементів характеризуються:

- високою температурою горіння;
- повторним займанням;
- тривалим тепловиділенням;
- виділенням токсичних газів.

Застосування води можливе для охолодження, проте при наявності металевого літію існує ризик реакції з водою з виділенням водню.

Тому з аналізу можна сказати, що це актуальна проблема, яку потрібно вирішувати розробленням ефективних способів та засобів гасіння пожеж за наявності літій іонних акумуляторів з врахуванням їх особливостей.

**Аналіз досліджень та публікацій.** У статті [11] досліджується ефективність різних типів переносних вогнегасників при гасінні літій-іонних батарей. Показано, що під час заряду-розряду можуть виникати неконтрольовані електротермічні процеси, що призводять до нагрівання, виділення газів

та пожежі. Автор аналізує ефективність водяних, порошкових і газових засобів гасіння.

У статті [12] аналізуються процеси теплового розгону літій-іонних батарей та методи їх гасіння. Проведено експерименти із використанням води та автоматичних систем пожежогасіння з борвмісними речовинами. Результати показали, що для гасіння батарей необхідне інтенсивне охолодження, а повне горіння акумулятора може тривати до однієї години.

У дослідженні [13] експериментально визначено, яким чином різні вогнегасні речовини (вода, CO<sub>2</sub>, порошки) впливають на зниження температури циліндричних літій-іонних акумуляторів типу 18650. Встановлено, що головною проблемою є тепловий розгін, коли одна батарея може спричинити займання сусідніх елементів.

У статті [14] проведено систематичний огляд причин виникнення пожеж у літій-іонних акумуляторах. Особливістю є те, що електроліт батареї є легкозаймистим органічним розчинником, тому пожежа супроводжується виділенням тепла і газів, що ускладнює гасіння.

У роботі [15] розроблено методіку дослідження пожежної небезпеки літій-іонних батарей, включаючи визначення температур займання та швидкість поширення теплового потоку. Показано, що пожежі акумуляторів є складними через виділення кисню під час екзотермічних реакцій, що підтримує горіння навіть без доступу повітря.

У роботі [16] проведено дослідження пожежної небезпеки літій-іонних елементів типу 18650, які широко використовуються в електротранспорті, дронах і портативній електроніці. Розроблено рекомендації щодо: інтенсивності подачі вогнегасної речовини; тактики дій пожежно-рятувальних підрозділів; схем розташування сил і засобів при гасінні пожеж батарей.

У роботі [17] досліджено ефективність водяного туману з добавками для придушення теплового розгону батарей. Експерименти показали, що оптимальний водяний туман здатний зменшити

температуру батареї з 700 °C до приблизно 413 °C, значно скорочуючи час охолодження.

Дослідження [18] присвячене пожежам акумуляторів LiFePO<sub>4</sub>, які широко використовуються у дронах, системах резервного живлення та електротранспорті. Автори встановили, що пожежі виникають через тепловий, механічний або електричний вплив, який викликає тепловий розгін і подальший вибух або горіння батарей.

У роботі [19] розглянуто явище теплового розгону, як головну причину пожеж батарей. Воно виникає через перегрів, внутрішні короткі замикання або дефекти виробництва, що може призвести до вибуху або займання акумулятора.

Дослідження ефективності гасіння легких металів різними вогнегасними речовинами представлено у роботах [20–25]. До легких металів відносяться алюміній, магній, берилій, кальцій, барій, літій і натрій які мають важливе промислове значення.

Згідно з результатами досліджень різних авторів, основні причини виникнення пожеж літій-іонних батарей є:

- перезаряд або глибокий розряд акумулятора;
- механічні пошкодження елементів батареї;
- внутрішні короткі замикання;
- перегрів або неправильна експлуатація акумуляторних систем.

Ці фактори можуть спричинити явище теплового розгону – неконтрольований процес швидкого підвищення температури батареї, що супроводжується виділенням тепла, горючих газів та токсичних продуктів горіння.

**Метою статті** є аналіз причин виникнення пожеж за участю літій-іонних акумуляторів, дослідження механізмів розвитку теплового розгону та визначення особливостей гасіння таких пожеж, а також узагальнення результатів сучасних наукових досліджень щодо ефективності різних вогнегасних засобів і способів ліквідації пожеж акумуляторних систем з урахуванням їх конструктивних та фізико-хімічних особливостей.

**Виклад основного матеріалу.** Літій-іонний елемент є герметизованою електрохімічною системою з високою питомою енергією (150–300 Вт·год./кг), що обумовлює наявність значного запасу внутрішньої хімічної та електричної енергії. Поєднання горючого електроліту, активних металевих оксидів та можливості

внутрішнього короткого замикання формує комплексну пожежну небезпеку, зокрема ризик розвитку термічного розгону.

Проаналізуємо окремі конструктивні елементи, щодо ризику пожежної небезпеки. На рисунку 1 детально наведено характеристику і склад літій-іонного елемента [26].



Рис. 1. Склад літій-іонного елемента

1. Катодні матеріали ( $\text{LiCoO}_2$ , NMC,  $\text{LiFePO}_4$  тощо) на основі оксидів перехідних металів є термічно нестійкими при підвищених температурах ( $>180\text{--}250\text{ }^\circ\text{C}$ ). Особливо небезпечними є кобальтовмісні матеріали ( $\text{LiCoO}_2$ ), які мають нижчу температуру початку екзотермічних реакцій порівняно з фосфатними системами ( $\text{LiFePO}_4$ ).

Основні ризики пожежної небезпеки є:

- деструкція кристалічної структури з виділенням кисню;
- екзотермічні реакції з електролітом;
- підтримання самоприскорювального горіння.

2. Анод (графіт або Si-композит) накопичує інтеркальований літій у процесі заряджання. При пошкодженні або перезарядженні можливе:

- осадження металевого літію (літієве дендритоутворення);
- пробій сепаратора;
- внутрішнє коротке замикання;
- утворення горючих газів ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ).

Графіт сам по собі не є легкозаймистим за нормальних умов, проте в присутності кисню та при високих температурах підтримує горіння.

3. Електроліт ( $\text{LiPF}_6$  + органічні карбонати) є основним джерелом горючості елемента.

Характерні небезпечні властивості:

- низька температура спалаху (приблизно  $20\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}$  для розчинників);
- утворення токсичних продуктів розкладу ( $\text{HF}$ ,  $\text{PF}_5$ );
- висока теплота згоряння.

При нагріванні або механічному пошкодженні відбувається швидке випаровування електроліту з утворенням вибухонебезпечної парогазової суміші.

4. Сепаратор (поліетилен, поліпропілен) є полімерним матеріалом з температурою плавлення  $120\text{--}170\text{ }^\circ\text{C}$ . Пожежна небезпека цього матеріалу теплове усадження або плавлення, втрата ізоляційних властивостей, ініціювання внутрішнього короткого

замикання, руйнування сепаратора часто є пусковим механізмом термічного розгону.

5. Металевий корпус виконує функцію механічного захисту та герметизації. Проте при зростанні внутрішнього тиску:

- відбувається розгерметизація;
- можливий викид полум'я;
- існує ризик вибухоподібного руйнування.

6. Механізм розвитку термічного розгону є самоприскорювальний екзотермічний процес, що складається з таких стадій:

- локальний перегрів (механічне пошкодження, перезаряд, зовнішній нагрів);
- руйнування SEI-плівки на аноді;
- плавлення сепаратора;
- внутрішнє коротке замикання;
- екзотермічні реакції електроліту та катодного матеріалу;

– різке зростання температури (до 800–1000 °C);

– вибух або факельне горіння.

Більшість існуючих літій іонних акумуляторів використовують сполуку  $\text{LiCoO}_2$ , як катод або позитивний електрод, і графіт, подібний до того, що міститься в олівцях, як анод або негативний електрод. Більшість батарей містить рідкий електроліт, який дозволяє іонам літію переміщуватися між електродами. Електроліт складається з літійової солі, наприклад  $\text{Li}[\text{PF}_6]$  розчиненої в органічному розчиннику, наприклад, суміші етиленкарбонату і диметилкарбонату. Коли ви розряджаєте батарею, іони літію рухаються від негативного електрода до позитивного електрода; а електрони проходять через електричний ланцюг, утворюючи електричний струм.

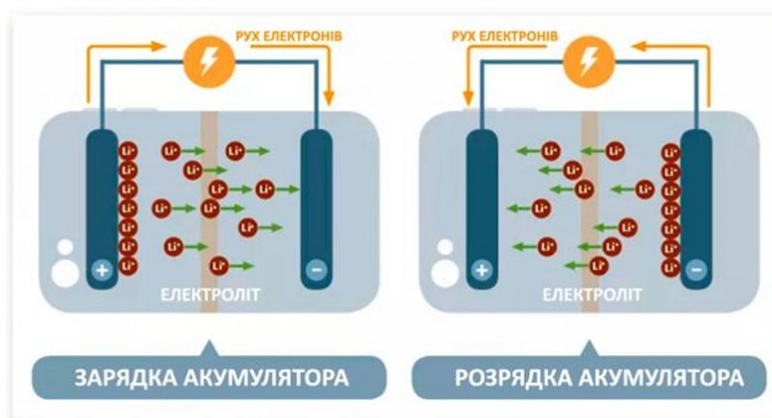


Рис. 2. Процес зарядки та розрядки літій-іонного акумулятора

Зростання використання літій-іонних акумуляторів у системах резервного живлення, зарядних станціях, павербанках та безпілотних літальних апаратах призвело до появи нових пожежних ризиків. Особливо актуально це для України в умовах блекаутів та широкого використання дронів у війні.

Особливість таких пожеж полягає у явищі теплового розгону, коли під дією температури починається ланцюгова реакція всередині акумулятора, що супроводжується виділенням горючих газів і кисню. У результаті пожежа може підтримуватися навіть без доступу зовнішнього повітря, що ускладнює її ліквідацію.

З аналізу використання традиційних засоби гасіння (вуглекислотні та порошкові вогнегасники загального призначення) не є

ефективні. Найбільш результативним способом є інтенсивне охолодження великою кількістю води або спеціальних охолоджувальних агентів, що дозволяє знизити температуру та зупинити тепловий розгін.

Основні факторами загоряння є перегрів, перезаряд, механічні пошкодження, внутрішні короткі замикання.

Особливості пожеж літій-іонних акумуляторів мають ряд специфічних характеристик:

Висока температура горіння – під час теплового розгону температура може перевищувати 600–800 °C.

Самопідтримуване горіння – у процесі хімічних реакцій всередині батареї

виділяється кисень, що підтримує горіння навіть без доступу повітря.

Можливість повторного займання – навіть після ліквідації пожежі батарея може знову загорітися через залишкове тепловиділення.

Виділення токсичних газів – під час горіння утворюються HF, CO, CO<sub>2</sub> та інші небезпечні речовини.

Ланцюгова реакція між елементами батареї – займання одного елемента може призвести до поширення пожежі на весь акумуляторний модуль.

Метод моделювання висвітлений в [27] дає можливість прогнозувати час виникнення горіння АКБ з урахуванням найпоширеніших сучасних катодних матеріалів, ємності (с), заряду (к), та густини зовнішнього теплового потоку (q) від дії відкритого полум'я (1) та без нього (2):

– з катодним матеріалом NCM (літій-нікель-манган-кобальт оксид LiNi<sub>x</sub>MnyCozO<sub>2</sub>):

$$\tau_{\text{NCM}} = 499 - 60 \cdot k - 312 \cdot q + 83 \cdot c + 47 \cdot k \cdot q - 27 \cdot k \cdot c - 40 \cdot q \cdot c + 22 \cdot k \cdot q \cdot c \quad (1)$$

$$\tau_{\text{NCM}'} = 5255 - 253 \cdot k - 3435 \cdot q + 1191 \cdot c + 169 \cdot k \cdot q - 51 \cdot k \cdot c - 773 \cdot q \cdot c + 26 \cdot k \cdot q \cdot c \quad (2)$$

– з катодним матеріалом NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній оксид LiNi<sub>x</sub>Co<sub>y</sub>AlzO<sub>2</sub>):

$$\tau_{\text{NCA}} = 453 - 66 \cdot k - 286 \cdot q + 86 \cdot c + 51 \cdot k \cdot q - 32 \cdot k \cdot c - 49 \cdot q \cdot c + 29 \cdot k \cdot q \cdot c, \quad (1)$$

$$\tau_{\text{NCA}'} = 4750 - 225 \cdot k - 3112 \cdot q + 1096 \cdot c + 147 \cdot k \cdot q - 51 \cdot k \cdot c - 717 \cdot q \cdot c + 34 \cdot k \cdot q \cdot c; \quad (2)$$

– з катодним матеріалом LFP (літій-ферум-фосфат, LiFePO<sub>4</sub>):

$$\tau_{\text{LFP}} = 540 - 75 \cdot k - 329 \cdot q + 103 \cdot c + 59 \cdot k \cdot q - 46 \cdot k \cdot c - 55 \cdot q \cdot c + 36 \cdot k \cdot q \cdot c, \quad (1)$$

$$\tau_{\text{LFP}'} = 5520 - 249 \cdot k - 3612 \cdot q + 1276 \cdot c + 177 \cdot k \cdot q - 78 \cdot k \cdot c - 848 \cdot q \cdot c + 31 \cdot k \cdot q \cdot c. \quad (2)$$

За результатами аналізу наукових публікацій та існуючих пожеж можна виділити такі основні труднощі гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів:

1. Складність припинення теплового розгону. Навіть після застосування

вогнегасних речовин внутрішні хімічні реакції можуть продовжуватися, що ускладнює повне припинення горіння.

2. Недостатня ефективність традиційних засобів гасіння. Порошкові та газові вогнегасники (CO<sub>2</sub>) здебільшого пригнічують полум'я, але не забезпечують достатнього охолодження батареї.

3. Необхідність інтенсивного охолодження. Більшість дослідників відзначає, що найефективнішим методом є охолодження великою кількістю води, яке дозволяє знизити температуру і зупинити тепловий розгін.

4. Ризик повторного займання. Навіть після ліквідації пожежі акумулятор може знову загорітися через внутрішні хімічні процеси.

5. Поширення пожежі на сусідні батареї. У батарейних модулях (зарядні станції, системи накопичення енергії, батареї дронів) пожежа може швидко поширюватися на інші елементи.

Рятувальники під час ліквідації таких пожеж стикаються з низкою проблем, зокрема:

– високою температурою горіння та швидким розвитком пожежі;

– небезпекою вибуху елементів акумуляторних батарей;

– інтенсивним виділенням токсичних продуктів горіння (фторовмісних сполук, чадного газу тощо);

– складністю доступу до осередку займання у батарейних модулях транспортних засобів;

– ризиком повторного займання через приховані осередки теплового розгону;

– недостатньою кількістю спеціалізованих тактичних рекомендацій та технічного оснащення.

З аналізу пожеж та досліджень, які наведені вище існують такі методами гасіння:

– інтенсивне охолодження водою;

– водяний туман;

– водяний туман з добавками;

– спеціальні системи пожежогасіння для акумуляторних модулів;

– контроль температури та системи раннього виявлення теплового розгону.

Використання пристроїв, які живляться літій-іонними акумуляторами, підвищує ризик виникнення пожеж, що потребує подальших досліджень та розробки ефективних вогнегасних речовин та методів пожежогасіння.

Також в повсякденній діяльності громадяни наражаються на небезпеку через недотримання правил експлуатації та зберігання акумуляторної техніки, використання несертифікованих зарядних пристроїв, механічні пошкодження батарей, а також відсутність належної поінформованості щодо дій у разі займання. Особливу загрозу становлять пожежі у житлових приміщеннях, на паркінгах, у громадських будівлях та під час транспортування електротехніки.

Таким чином, проблема гасіння пожеж за наявності літій-іонних акумуляторів полягає у невідповідності традиційних підходів до пожежогасіння специфіці розвитку таких пожеж, недостатній адаптації нормативно-методичної бази, обмеженості спеціалізованих технічних засобів та необхідності підвищення рівня підготовки рятувальників і обізнаності населення. Це зумовлює потребу у комплексному науковому дослідженні механізмів розвитку пожеж за участю літій-іонних акумуляторів, удосконаленні тактики їх гасіння, розробленні вогнегасних речовин та превентивних заходів безпеки.

### **Висновки**

Проведений аналіз реальних пожеж, пов'язаних із літій-іонними акумуляторами, кількість яких зростає. Встановлено, що основними причинами займання літій-іонних акумуляторів є перегрів, перезаряд,

механічні пошкодження, внутрішні короткі замикання та порушення правил експлуатації. Ці фактори можуть призводити до розвитку теплового розгону – неконтрольованого самоприскорювального процесу, що супроводжується різким підвищенням температури, виділенням горючих і токсичних газів, а також вибухонебезпечними явищами.

Аналіз результатів сучасних наукових досліджень показує, що традиційні засоби пожежогасіння (вуглекислотні та порошкові вогнегасники) мають обмежену ефективність, оскільки вони здебільшого пригнічують полум'я, але не забезпечують достатнього охолодження акумуляторних елементів і не запобігають повторному виникненню теплового розгону.

З огляду на зростання використання літій-іонних акумуляторів у побуті, транспорті, системах автономного енергоживлення та безпілотних літальних апаратах, актуальним є подальше проведення комплексних наукових досліджень, спрямованих на:

- удосконалення тактики гасіння пожеж акумуляторних систем;
- розроблення нових вогнегасних речовин і технологій пожежогасіння;
- створення спеціалізованого обладнання для пожежно-рятувальних підрозділів;
- підвищення рівня обізнаності населення щодо безпечної експлуатації акумуляторних пристроїв.

Таким чином, вирішення проблеми пожеж літій-іонних акумуляторів потребує комплексного підходу, який поєднує наукові дослідження, удосконалення нормативно-методичної бази, підготовку рятувальників та впровадження сучасних технічних засобів пожежогасіння.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. На Львівщині понад чотири години гасили пожежу у складській будівлі. URL: <https://suspilne.media/lviv/1170870-na-lvivsini-ponad-cotiri-godini-gasili-pozezu-u-skladskij-budivli/>
2. У київській квартирі під час зарядки вибухнув павербенк. URL: <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/332827-u-kiyivskiy-kvartiri-pid-chas-zaryadki-vibuhnuv-paverbenk>
3. Вибух акумулятора у Львові зруйнував дві квартири. URL: <https://zaxid.net/shhe-odin-vibuh-akumulyatora-u-lvovi-zruynuvav-dvi-kvartiri-n1555330>

4. Вночі на Волині у будинку вибухнув акумулятор. URL: <https://www.volynnews.com/news/all/vnochi-na-volyni-u-budynku-vybukhnuv-akumuliator/>
5. Неподалік центру Львова в будинку вибухнув акумулятор і сталась пожежа. URL: [https://tvoemisto.tv/news/u-lvovi-v-budynku-vybuhnuv-akumulyator-i-stalas-pozhezha-171514.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://tvoemisto.tv/news/u-lvovi-v-budynku-vybuhnuv-akumulyator-i-stalas-pozhezha-171514.html?utm_source=chatgpt.com)
6. У Каліфорнії горить один з найбільших у світі акумуляторних заводів. URL: <https://ukranews.com/ua/news/1059154-vogon-u-kaliforniyi>
7. У Львові загорівся акумулятор електросамоката. URL: [https://unn.ua/en/news/electric-scooter-battery-caught-fire-in-lviv-two-children-among-the-injured?utm\\_source=chatgpt.com](https://unn.ua/en/news/electric-scooter-battery-caught-fire-in-lviv-two-children-among-the-injured?utm_source=chatgpt.com)
8. У Львові сталася пожежа в готелі «Власта». URL: <https://city-adm.lviv.ua/news/society/emergency/u-lvovi-stalasia-pozhezha-v-hoteli-vlasta-onovleno/>
9. В офісі у центрі Франківська вибухнула зарядна станція, двоє постраждалих. URL: [https://zaxid.net/v-ofisi-u-tsentri-frankivska-vybuhnula-zaryadna-stantsiya-dvoye-postrazhdalih-n1623096?utm\\_source=chatgpt.com](https://zaxid.net/v-ofisi-u-tsentri-frankivska-vybuhnula-zaryadna-stantsiya-dvoye-postrazhdalih-n1623096?utm_source=chatgpt.com)
10. Union Street fire. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Union\\_Street\\_fire?utm\\_source=chatgpt.com](https://en.wikipedia.org/wiki/Union_Street_fire?utm_source=chatgpt.com)
11. Efficiency of using portable fire extinguishers when extinguishing lithium-ion batteries. *Municipal Economy of Cities*. 2024. № 4 (185). Pp. 166–171. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-166-171>
12. Un C., Aydin K. Thermal Runaway and Fire Suppression Applications for Different Types of Lithium Ion Batteries. *Vehicles*. 2021. № 3. Pp. 480–497. URL: <https://doi.org/10.3390/vehicles3030029>
13. Lazarenko O., Pazen O., Ferents N., Adolf I., Parkhomenko V. P. Experimental determination of the effect of fire-extinguishing agents on a decrease in the temperature indicators of cylindrical lithium-ion batteries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. № 2. Pp. 45–53.
14. Ghiji M., Novozhilov V., Moinuddin K., Joseph P., Burch I., Suendermann B., Gamble G. A. Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies*. 2020. № 13. Pp. 5117. URL: <https://doi.org/10.3390/en13195117>
15. Гаврилюк А., Яковчук Р. Методика експериментальних досліджень поведінки літій-іонних батарей під дією відкритого полум'я. *Науковий вісник : цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2 (16). С. 32–41.
16. Лазаренко О. В., Пархоменко В. П., Великий Я. Б., Посполітак В. І. Дослідження пожежної небезпеки літій-іонного елемента живлення Panasonic NCR18650B": науково-дослідна робота № 0122U200128. Львів : ЛДУ БЖД, 2023. 92 с.
17. Li L., Chen Z., Lu Y., Zang P., Wang Z., Cheng Y. Study on the suppression of thermal runaway of lithium-ion battery by water mist with different additives. *Energy Sources, Part A : Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2023. Vol. 45, № 4. Pp. 11349–11362. DOI: 10.1080/15567036.2023.2257613.
18. Yuan L., Tang W., Thomas R. A., Soles J. Experimental study on suppression of lithium iron phosphate battery fires. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024. Vol. 41, № 2. Pp. 637–645. URL: <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00938-y>
19. Chen Z., Zhang J., Liu C., Yang C., Chen S. Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries : a Review of Mechanisms, Prediction Approaches, and Mitigation Strategies. *Batteries*. 2026. № 12. Pp. 88. URL: <https://doi.org/10.3390/batteries12030088>
20. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskiy R., Kovalyshyn V., Lozynskiy R. Обґрунтування технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 30–40. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.04>
21. Ковалишин В., Марич В., Веселівський Р., Ковалишин В., Чернецький В. Оптимізація рецептури вогнегасного порошку спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу А, В та D. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2 (16). С. 123–134. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2(16).123-134)
22. Kovalyshyn V., Marych V., Kyryliv Y., Koshelenko V., Mirus O. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів. *Пожежна безпека*. 2018. № 29. С. 46–56. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/33>
23. Husar B., Kovalyshyn V., Marych V., Lozynskiy R., Pastukhov P. Комбіноване гасіння пожеж класу D та А, В. *Пожежна безпека*. 2019. № 35. С. 30–34. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.05>
24. Ковалишин В. В., Гусар Б. М., Ковалишин В. В., Марич В. М. Вогнегасний порошок спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу D, А, В. Патент на корисну модель 145068 Україна : МПК (2020.01), A62D 1/00 № u 2019 11577; заявл. 02.12.2019; опубл. 25.11.2020. Бюл. № 22. 3 с.
25. Kovalyshyn V., Mirus O., Marych V., Kovalyshyn V., Lozynskiy R. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна безпека*. 2018. № 28. С. 58–63. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/226>
26. Whittingham M. S., Stanley B., Yoshino A. A. Retrospective on lithium-ion batteries. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16259-9>
27. Гаврилюк А. Ф. Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів) : дис. д-ра техн. наук : 21.06.02. Львів, 2025. 395 с.

## REFERENCES

1. *Na L'vivshchyni ponad chotyry hodyny hasyly pozhezhu u sklads'kiy budivli* [In the Lviv region, a warehouse fire was extinguished for over four hours]. URL: <https://suspilne.media/lviv/1170870-na-lvivsini-ponad-cotiri-godini-gasili-pozezu-u-skladskij-budivli/> (in Ukrainian).
2. *U kyiviv'kiy kvartyri pid chas zaryadky vybukhnuv paverbenk* [In a Kyiv apartment, a power bank exploded during charging]. URL: <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/332827-u-kiyvskiy-kvartiri-pid-chas-zaryadki-vibuhnuv-paverbenk/> (in Ukrainian).
3. *Vybukh akumulyatora u L'vovi zruynuvav dvi kvartyry* [A battery explosion in Lviv destroyed two apartments]. URL: <https://zaxid.net/shhe-odin-vibuh-akumulyatora-u-lvovi-zruynuvav-dvi-kvartiri-n1555330> (in Ukrainian).
4. *Vnochi na Volyni u budynku vybukhnuv akumulyator* [At night in Volyn, a battery exploded in a house]. URL: <https://www.volynnews.com/news/all/vnochi-na-volyni-u-budynku-vybukhnuv-akumulyator/> (in Ukrainian).
5. *Nepodalik tsentru L'vova v budynku vybukhnuv akumulyator i stalas' pozhezha* [Near the center of Lviv, a battery exploded in a building, causing a fire]. URL: [https://tvoemisto.tv/news/u-lvovi-v-budynku-vybuhnuv-akumulyator-i-stalas-pozhezha-171514.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://tvoemisto.tv/news/u-lvovi-v-budynku-vybuhnuv-akumulyator-i-stalas-pozhezha-171514.html?utm_source=chatgpt.com) (in Ukrainian).
6. *U Kaliforniyi horyt' odyń z naybil'shykh u sviti akumulyatornykh zavodiv* [One of the world's largest battery factories is on fire in California]. URL: <https://ukranews.com/ua/news/1059154-vogon-u-kaliforniyi> (in Ukrainian).
7. *U L'vovi zahorivsyia akumulyator elektrosamokata* [In Lviv, an electric scooter battery caught fire]. URL: [https://unn.ua/en/news/electric-scooter-battery-caught-fire-in-lviv-two-children-among-the-injured?utm\\_source=chatgpt.com](https://unn.ua/en/news/electric-scooter-battery-caught-fire-in-lviv-two-children-among-the-injured?utm_source=chatgpt.com) (in Ukrainian).
8. *U L'vovi stalasyia pozhezha v hoteli "Vlasta"* [A fire broke out at the Vlasta Hotel in Lviv]. URL: <https://city-adm.lviv.ua/news/society/emergency/u-lvovi-stalasyia-pozhezha-v-hoteli-vlasta-onovleno/> (in Ukrainian).
9. *V ofisi u tsentri Frankivs'ka vybukhnula zaryadna stantsiya, dvoje postrazhdalykh* [In an office in central Frankivsk, a charging station exploded, injuring two people]. URL: [https://zaxid.net/v-ofisi-u-tsentri-frankivska-vibuhnula-zaryadna-stantsiya-dvoje-postrazhdalih-n1623096?utm\\_source=chatgpt.com](https://zaxid.net/v-ofisi-u-tsentri-frankivska-vibuhnula-zaryadna-stantsiya-dvoje-postrazhdalih-n1623096?utm_source=chatgpt.com) (in Ukrainian).
10. Union Street fire. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Union\\_Street\\_fire?utm\\_source=chatgpt.com](https://en.wikipedia.org/wiki/Union_Street_fire?utm_source=chatgpt.com)
11. Efficiency of using portable fire extinguishers when extinguishing lithium-ion batteries. *Municipal Economy of Cities*. 2024, no. 4 (185), pp. 166–171. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-166-171>
12. Un C. and Aydın K. Thermal Runaway and Fire Suppression Applications for Different Types of Lithium Ion Batteries. *Vehicles*. 2021, no. 3, pp. 480–497. URL: <https://doi.org/10.3390/vehicles3030029>
13. Lazarenko O., Pazen O., Ferents N., Adolf I. and Parkhomenko V.P. Experimental determination of the effect of fire-extinguishing agents on a decrease in the temperature indicators of cylindrical lithium-ion batteries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025, no. 2, pp. 45–53.
14. Ghiji M., Novozhilov V., Moinuddin K., Joseph P., Burch I., Suendermann B. and Gamble G.A. Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies*. 2020, no. 13, pp. 5117. URL: <https://doi.org/10.3390/en13195117>
15. Havryliuk A. and Yakovchuk R. *Metodyka eksperymental'nykh doslidzhen' povedinky lityi-ionnykh batarey pid diyeyu vidkrytoho polum'ya* [Experimental Methodology for Studying the Behavior of Lithium-Ion Batteries under Open Flame]. *Naukovyy visnyk : tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezha bezpeka* [Scientific Bulletin : Civil Protection and Fire Safety]. 2023, no. 2 (16), pp. 32–41. (in Ukrainian).
16. Lazarenko O.V., Parkhomenko V.P., Velykyi Ya.B. and Pospolitat V.I. *Doslidzhennya pozhezhoi nebezpeky lityi-ionnoho elementu zhyvlennya Panasonic NCR18650B* : *Naukovo-doslidna robota № 0122U200128* [Study of the Fire Hazard of the Panasonic NCR18650B Lithium-Ion Cell : research work no. 0122U200128]. Lviv : Lviv State University of Fire Safety, 2023, 92 p. (in Ukrainian).
17. Li L., Chen Z., Lu Y., Zang P., Wang Z. and Cheng Y. Study on the suppression of thermal runaway of lithium-ion battery by water mist with different additives. *Energy Sources. Part A : Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2023, vol. 45, no. 4, pp. 11349–11362. DOI: 10.1080/15567036.2023.2257613.
18. Yuan L., Tang W., Thomas R. A. and Soles J. Experimental study on suppression of lithium iron phosphate battery fires. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024, vol. 41, no. 2, pp. 637–645. URL: <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00938-y>
19. Chen Z., Zhang J., Liu C., Yang C. and Chen S. Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries : a Review of Mechanisms, Prediction Approaches, and Mitigation Strategies. *Batteries*. 2026, no. 12, pp. 88. URL: <https://doi.org/10.3390/batteries12030088>
20. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskiy R., Kovalyshyn V. and Lozynskiy R. *Obgruntuvannya tekhnolohiyi hasinnya kombinovanykh pozhezha za nayavnosti lehkyykh metaliv chy fosforykh spoluk* [Substantiation of technology for extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds]. *Pozhezha bezpeka* [Fire safety]. 2024, no. 44, pp. 30–40. URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.04> (in Ukrainian).
21. Kovalyshyn V., Marych V., Veselivskiy R., Kovalyshyn V. and Chernetsky V. *Optimizatsiya retseptury vohnehasnoho poroshku spetsial'noho pryznachennya dlya kombinovanoho hasinnya pozhezha klasu A, B ta D* [Optimization of the formulation of special-purpose fire extinguishing powder for combined extinguishing of class A, B and D fires]. *Naukovyy visnyk : tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezha bezpeka* [Scientific Bulletin : Civil Protection and Fire Safety]. 2023, no. 2 (16), pp. 123–134. URL: [https://doi.org/10.33269/nvz.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvz.2023.2(16).123-134) (in Ukrainian).

22. Kovalyshyn V., Marych V., Kyryliv Y., Koshelenko V. and Mirus O. *Doslidzhennya khimichnykh rehovyn, yak skladnykiv vohnehasnykh poroshkiv dlya hasinnya lehkykh metaliv* [Research of the chemicals usable in fire extinguishing powder for light metal fires extinguish]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Safety]. 2018, no. 29, pp. 46–56. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/33> (in Ukrainian).

23. Husar B., Kovalyshyn V., Marych V., Lozynskyi R. and Pastukhov P. *Kombinovane hasinnya pozhezh klasu D ta A, B* [Combined extinguishing of class D, class A and class B fires]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Safety]. 2019, no. 35, pp. 30–34. URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.05> (in Ukrainian).

24. Kovalyshyn V.V., Husar B.M., Kovalyshyn V.V. and Marych V.M. *Vohnehasnyy poroshok spetsial'noho pryznachennya dlya kombinovanoho hasinnya pozhezh klasu D, A, B. Patent na korysnu model' 145068 Ukrayina : MPK (2020.01), A62D 1/00 № u 2019 11577; zayavl. 02.12.2019; opubl. 25.11.2020* [Special-purpose fire extinguishing powder for combined extinguishing of class D, A, and B fires. Patent for utility model. 145068 Ukraine : MPC (2020.01), A62D 1/00 № u 2019 11577; submitted on 02.12.2019; published on 25.11.2020.]. Bulletin no. 22, 3 p. (in Ukrainian).

25. Kovalyshyn V., Mirus O., Marych V., Kovalyshyn V. and Lozynskyi R. *Problemy hasinnya mahniyu ta yoho splaviv* [The problems of magnesium and its alloy extinguishing]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Safety]. 2016, no. 28, pp. 58–63. (in Ukrainian).

26. Whittingham M.S., Stanley B. and Yoshino A.A. Retrospective on lithium-ion batteries. *Nature Communications*. 2020, vol. 11. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16259-9>

27. Havryliuk A.F. *Rozvytok naukovykh osnov protypozhezhnoho zakhystu elektrychnykh kolisnykh transportnykh zasobiv (elektromobiliv) : dys. d-ra tekhn. nauk: 21.06.02* [Development of the Scientific Foundations of Fire Protection for Electric Wheeled Vehicles (Electric Cars) : Doctoral Dissertation in Technical Sciences, 21.06.02]. Lviv, 2025, 395 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 30.03.2026.

Прийнято після рецензування: 25.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 628.11:628.3

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.99.1246

## СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА ВИКОРИСТАННЯ ДОЩОВОЇ ВОДИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД РАЦІОНАЛЬНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

КУЛІК М. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ІВАНЕНКО Д. С.<sup>2</sup>, асп.,  
ЩЕНКО О. Л.<sup>3</sup>, ст. викл.,  
ЩЕРБИНА С. О.<sup>4</sup>, студ.

<sup>1\*</sup> Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Університетська, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (099) 088-22-83, e-mail: [starwarskmv4@gmail.com](mailto:starwarskmv4@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4880-5217>

<sup>2</sup> Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Університетська, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (068) 528-67-86, e-mail: [d.sergeevich108@gmail.com](mailto:d.sergeevich108@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1635-1214>

<sup>3</sup> Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Університетська, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (095) 336-32-50, e-mail: [e.l.feneko@gmail.com](mailto:e.l.feneko@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4152-6135>

<sup>4</sup> Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Університетська, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (050) 722-26-87, e-mail: [s.reklama2010@gmail.com](mailto:s.reklama2010@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0008-0315-0596>

**Анотація.** Водні ресурси забезпечують усі сфери життя і господарської діяльності людини, визначають можливості розвитку промисловості, сільського господарства й оздоровлення людей. Сьогодні понад половини населення світу живе у містах, а кількість жителів там швидко зростає. В той же час запаси ґрунтових вод не встигають поповнюватися, тож прогнозується, що до кінця 2025 року близько 1,8 млрд людей житимуть у регіонах чи країнах з абсолютним дефіцитом води [1]. У роботі розглянуто проблему дефіциту водних ресурсів в Україні, яка загострюється в умовах воєнного стану та зміни клімату. Проведено аналіз сучасних підходів до економії та повторного використання води, зокрема буріння свердловин, очищення стічних вод, новітніх технологій збору вологи з повітря та збору дощової води. Основну увагу приділено дослідженню можливостей збору та повторного використання дощових опадів на прикладі покрівлі головного корпусу Національного університету «Запорізька політехніка». Виконано розрахунки обсягів зібраної води, визначено необхідні параметри обладнання, принципи його розміщення та підключення. Особливо розглянуто варіанти використання дощової води для технічних і питних потреб, а також методи її очищення. *Наукова новизна роботи* полягає у комплексному підході до впровадження систем збору дощової води як альтернативного джерела водопостачання для побутових та промислових потреб. Практична значущість дослідження проявляється у можливості зменшення навантаження на міські мережі, економії ресурсів та підвищенні рівня водної безпеки в умовах воєнного стану.

**Ключові слова:** водні ресурси; дощова вода; ресурсозбереження; повторне використання ресурсів; інженерні мережі; водопостачання

## RAINWATER HARVESTING SYSTEMS AS AN EFFECTIVE METHOD OF SUSTAINABLE WATER SUPPLY UNDER MARTIAL LAW CONDITIONS

KULIK M.V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
IVANENKO D.S.<sup>2</sup>, *PhD Student*,  
ISHCHENKO O.L.<sup>3</sup>, *Senior Lecturer*,  
SHCHERBYNA S.O.<sup>4</sup>, *Stud.*

<sup>1\*</sup> Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Universytetska Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (099) 088-22-83, e-mail: [starwarskmv4@gmail.com](mailto:starwarskmv4@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4880-5217>

<sup>2</sup> Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Universytetska St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (068) 528-67-86, e-mail: [d.sergeevich108@gmail.com](mailto:d.sergeevich108@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1635-1214>

<sup>3</sup> Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Universytetska St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (95) 336-32-50, e-mail: [e.l.fenenko@gmail.com](mailto:e.l.fenenko@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4152-6135>

<sup>4</sup> Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Universytetska St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (050) 722-26-87, e-mail: [s.reklama2010@gmail.com](mailto:s.reklama2010@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0008-0315-0596>

**Abstract.** The development of industry, agriculture and improvement of human health largely depends on water resources. Today, more than half of the world's population lives in cities, and the number of inhabitants there is rapidly increasing. At the same time, groundwater reserves do not have enough time to replenish, therefore it is predicted that by the end of 2025 about 1.8 billion people will live in regions or countries with absolute water scarcity [1]. The paper examines the problem of water resource scarcity in Ukraine, which is becoming more acute under martial law and climate change. An analysis of modern approaches to water saving and reuse is carried out, in particular drilling wells, wastewater treatment, advanced technologies for extracting moisture from the air, and rainwater harvesting. The main attention is paid to studying the possibilities of collecting and reusing rainwater using the example of the roof of the main building of the National University Zaporizhzhia Polytechnic. Calculations of the volumes of collected water are performed, the required equipment parameters, principles of its placement and connection are determined. Options for using rainwater for technical and drinking purposes, as well as methods of its treatment, are considered separately. *The scientific novelty of the work* lies in a comprehensive approach to the implementation of rainwater harvesting systems as an alternative source of water supply for domestic and industrial needs. The practical significance of the study is manifested in the possibility of reducing the load on urban networks, saving resources and increasing the level of water security under martial law conditions [1].

**Keywords:** *water resources; rainwater; resource saving; resource reuse; engineering networks; water supply*

**Вступ.** На сьогоднішній день понад мільярд людей не можуть в достатній кількості отримати чисту питну воду. Адже вода – основне джерело життя, роль якого в забезпеченні функціонування живого організму переоцінити просто неможливо. Вода потрібна всьому сущому: людям, представникам флори і фауни нашої планети [2]. Сьогодні близько 2 млрд людей у світі позбавлені доступу до безпечної питної води. Більшість із них живе в уразливих регіонах світу, де часто відбуваються конфлікти як громадянські, так і військові. Сьогодні понад половини населення світу живе у містах, а кількість жителів там швидко зростає. В той же час запаси ґрунтових вод не встигають поповнюватися. До кінця 2025 року близько 1,8 млрд людей житимуть у регіонах чи країнах з абсолютним дефіцитом води [1].

Вода є стратегічним, життєво-важливим природним ресурсом, що має особливе значення. Вона є національним багатством кожної країни, однією з природних основ її економічного розвитку. Водні ресурси забезпечують усі сфери життя і господарської діяльності людини, визначають можливості розвитку

промисловості, сільського господарства й оздоровлення людей.

Вода – це, на жаль, обмежений ресурс, особливо у південних та східних регіонах України. Військові дії значно погіршують ситуацію з водою в нашій країні.

Окрім розумного споживання, потрібно сприяти зберіганню, відновленню та повторному використанню водних ресурсів. Одним з перспективних методів збереження водних ресурсів є вторинне використання дощової води та її тимчасове зберігання [3].

**Метою цієї статті** є побудова принципової схеми збору дощової води для подальшого використання, аналіз та визначення особливостей улаштування необхідного обладнання.

**Методологія дослідження** базується на аналізі наукової літератури в області економії енергоресурсів, зокрема використання дощової води для технічних та господарських потреб населення. Проаналізовано практичний досвід будівельних організацій, існуючі технології та обладнання, що використовується при проектуванні систем збору, акумуляції та використанні дощової води для подальшого визначення особливостей улаштування,

підключення та встановлення вузлів таких систем на прикладі конкретного об'єкту.

**Стан проблеми та цілі дослідження.** За запасами доступних для використання водних ресурсів Україна належить до малозабезпечених. За цим показником Україна перебуває на 111 місці серед 152 країн світу. Серед 20 європейських країн посідає 17 місце. Клімат в Україні набуває тропічних ознак з тривалими бездошовими періодами, падінням рівня ґрунтових вод та масовим пересиханням дрібних річок та колодязів. За прогнозами протягом наступних 30 років слід очікувати на подальше зростання дефіциту прісної води, а після 2050 року Україна може навіть перейти до її імпорту.

Важливо відмітити, що за сценарієм значного підвищення концентрації парникових газів, зменшення водності у річках буде суттєво сильнішим.

Найгірша ситуація у басейнах Південного Бугу та Дністра, де до кінця століття річковий стік може знизитися більш ніж на третину. Крім того, водний стік малих річок (зокрема в басейні Південного Бугу) теж поступово зменшується, а з середини століття може зовсім припинитися. Таким чином наприкінці століття може сформуватися ситуація стійкого дефіциту водних ресурсів у південному регіоні, що значно обмежить розвиток секторів економіки, які залежать від водних ресурсів.

Додатковою проблемою є вплив зміни клімату на південні регіони. Вчені зазначають, що з 2041 року можливе припинення місцевого поверхневого стоку у маловодні річки у Херсонській, Одеській, Миколаївській, Дніпропетровській та Запорізькій областях. Наприклад, у Запорізькій області «кліматичний стік» може зменшитися вдесятеро, у Дніпропетровській – у 6, у Миколаївській – у 3,6 рази, а в Криму – удвічі [1].

Наукова література свідчить про активний розвиток автоматизації та роботизації в будівельній галузі. Зокрема, у роботі Глушенко, Р., Ткаченко, Т. було розглянуто впровадження та створення «зелених» покрівель житлового будинку для

збору, накопичення та повторного використання дощових стічних вод. Дослідження показало, що зелені покрівлі здатні забезпечити фільтрацію води на рівні, коли основні фізико-хімічні параметри відповідають показникам для питної води. Отримана вода здатна покрити потреби, як мінімум, на полив, а додаткові фінансові витрати на створення таких покрівель не є принциповими порівняно з вартістю квартир [11].

На сучасному ринку існують компанії, які пропонують декілька варіантів економії енергоресурсів за рахунок різних підходів та джерел альтернативних міському водопостачанню. Розглянемо основні рішення:

- Сverdlovina - це найбільш простий і розповсюджений спосіб вирішення питань водопостачання в регіонах, де відсутнє близьке залягання водоносних шарів. Але має суттєві недоліки, які включають у себе: високу вартість буріння, потребу в спеціалізованому обладнанні, недостатню кількість та якість води.

- Переробка стічних вод – для повторного використання. Вода проходить важкі етапи дезінфекції та фільтрації. Проте існують і недоліки: висока вартість інсталяції та експлуатації сучасних очисних споруд, складність видалення специфічних забруднювачів, а також ризик потрапляння токсичних речовин або патогенів у повторно використану воду, що вимагає ретельного контролю та дотримання технологічних процесів.

- Новітні технології – за основу береться конденсація вологи з повітря. Міжнародна команда хіміків розробила композитний матеріал із використанням органічних кристалів, здатний збирати воду з водяної пари без електрики. Для його реалізації розроблено «розумні» кристали. Вчені назвали розробку «кристалами Януса» (Janus crystals) [5]. Але це новітні технології, які ще не скоро зможуть використовуватись в нашій країні в достатній кількості, до того ж вони дуже вартісні.

- Збір дощової води – це давня практика, яка зараз використовується для

зменшення ризиків повеней та посухи. Це добре відоме рішення з різним рівнем передових технологій, пов'язаних з ним [6]. Використовуючи цю практику, можна в достатній мірі задовольнити потреби у воді без значних витрат на обладнання.

У більшості розвинених країн світу збір та використання дощової води з дахів розглядається не лише як альтернатива централізованому водопостачанню, а й як важливий елемент стратегії сталого розвитку міст.

Основними напрямками є застосування зібраної води для технічних потреб (змив санітарних приладів, полив зелених насаджень, прибирання, пожежогасіння), що дозволяє суттєво зменшити споживання питної води. В деяких містах в Китаї підтримують цей підхід і досліджують оптимальне розміщення систем для боротьби з міськими повенями.

У країнах із дефіцитом водних ресурсів (Австралія, Сінгапур) дощова вода після очистки використовується і як джерело питного водопостачання.

Ефективність впровадження національного стандарту по збору дощової води значною мірою залежить від державної підтримки: законодавчих норм, обов'язкових вимог до будівництва, податкових стимулів чи субсидій. Такі заходи дозволяють

поєднати економію ресурсів зі зменшенням навантаження на каналізаційні мережі та запобіганням міським підтопленням [6].

**Виклад основного матеріалу.** Збір дощової води і повторне використання є давньою практикою водопостачання. Приклади систем датуються періодом неоліту. Розвиток цивілізацій часто вигравав від зберігання дощової води та її планового використання з часом. Цей спосіб все ще використовується як основне джерело водопостачання для мільйонів у країнах, що розвиваються. Однак навіть у розвинених країнах збір і повторне використання дощової води все більше заохочується нормативними актами та законами, що є стійким рішенням для підвищення стабільності водопостачання.

Збір дощової води і повторне використання належать до набору методів управління водними ресурсами, відомих як найкраща практика управління водного господарства, які також називаються рішеннями для розробки з низьким рівнем впливу або стійкими дренажними системами залежно від країни.

Інтерес до цієї практики очевидний через різке збільшення кількості документів, отриманих за допомогою пошуку Scopus із ключовими словами «збір дощової води», яке не має ознак зменшення [6] (рис. 1).

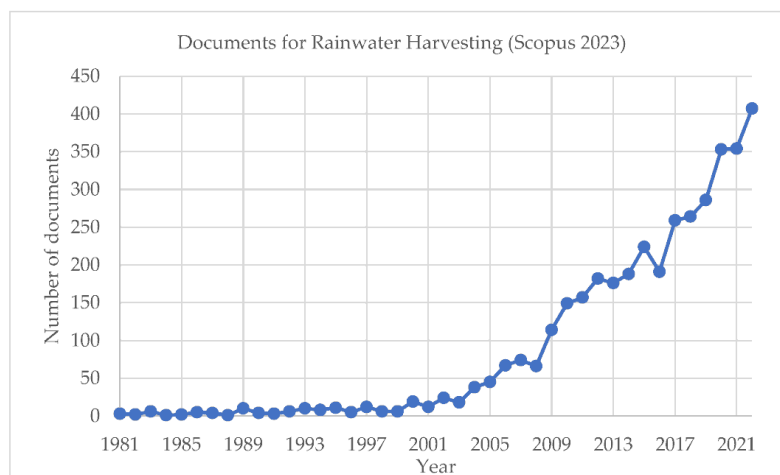


Рис. 1. Кількість документів у Scopus (6 лютого 2023, що відповідають ключовому слову «збір дощової води»)

Для дослідження і розрахунків взято покрівлю будівлі головного корпусу Національного університету «Запорізька політехніка», розташованого за адресою:

вул. Університетська, 64, м. Запоріжжя. Площа даху за попередніми розрахунками складає 340 м<sup>2</sup>.

Місяці з найбільшою кількістю опадів – червень, липень, травень – 151 мм опадів. Більшість опадів відбувається в червні,

середня кількість – 52 мм. Річна кількість опадів у Запоріжжі становить 528 мм (рис. 2) [12].

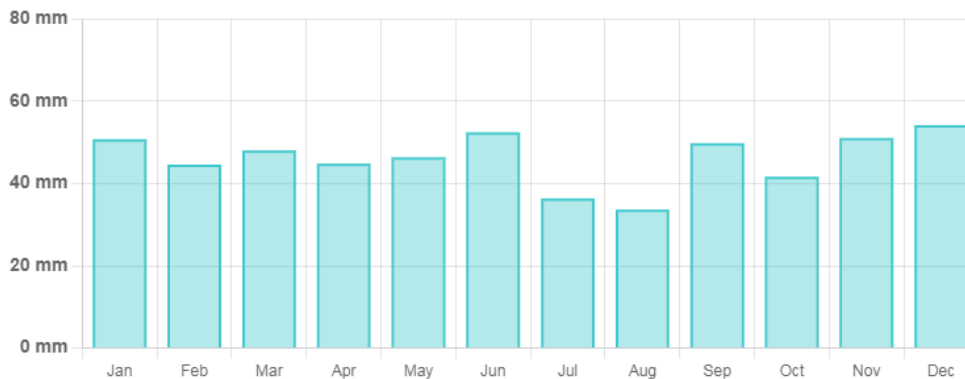


Рис. 2. Середні кліматичні дані атмосферних опадів у м. Запоріжжі [7]

Розраховуючи річний обсяг опадів у вигляді дощу, потрібно враховувати коефіцієнт стоку води, до якого входять втрати у вигляді природних випарів, водопоглинання матеріалів покрівлі та водовідведення та частина води, яка затримується у нерівностях поверхні. Коефіцієнт стоку води залежить від інтенсивності та часу опадів.

Для розрахунку річного об'єму дощових вод візьмемо середній коефіцієнт похилих дахів 0,75.

Отримаємо (1):

$$Q_{\text{річ}} = H \times I \times F, \quad (1)$$

де  $Q_{\text{річ}}$  – річний об'єм дощових вод, м<sup>3</sup>/рік;  $H$  – річна кількість опадів для м. Запоріжжі;  $I$  – середній нахил поверхні покрівлі, приймаємо 0,75;  $F$  – водозабірна площа, м<sup>2</sup>.

Тоді:

$$Q = 0,528 \times 0,75 \times 340 = 134,64 \text{ (м}^3\text{/рік)}$$

або приблизно 11,22 м<sup>3</sup> на місяць.

Щоб визначити необхідний об'єм, кількість резервуарів для зберігання води та потужність насосів, будемо керуватися вимогами ДБН В.2.5-64:2012 «Внутрішній водопровід та каналізація» [9].

Розрахункову кількість дощових вод  $Q$ , л/с, з водозбірної площі визначають за формулою (2):

$$Q = k_R \cdot F \cdot r, \quad (2)$$

де  $k_R$  – коефіцієнт ризику, який визначається залежно від категорії відповідальності водостічної системи, що проектується;  $F$  –

водозбірна площа, м<sup>2</sup>;  $r$  – мінімальна розрахункова інтенсивність дощу, л/(с·м<sup>2</sup>), для даної місцевості, яку визначають за формулою:

$$r = \frac{K \cdot q_{20}}{10000}, \quad (3)$$

де  $q_{20}$  – інтенсивність дощу, л/с, з 1 га (для даної місцевості) тривалістю 20 хв. при періоді однократного перевищення розрахункової інтенсивності, яка дорівнює 1 рік (приймається згідно з правилами влаштування зовнішніх мереж і споруд) [10];  $K$  – коефіцієнт, що враховує збільшення стоку за умови збільшення інтенсивності дощу тривалістю менше 20 хв. та визначається за рисунком 1 у залежності від параметрів  $n$  та  $B$ ;  $n$  – параметр, який приймається згідно з правилами влаштування зовнішніх мереж і споруд;  $B$  – параметр, який визначають за формулою:

$$B = \frac{L^2}{I \cdot q_{20}^{1,5}}, \quad (4)$$

де  $I$  – середній нахил поверхні покрівлі;  $L$  – довжина шляху руху дощової води від гребня до розжолобка, м.

Тоді:

$$B = \frac{10000 \cdot 15^2}{58 \cdot 91,8^{1,5}} = 44,1.$$

Коефіцієнт  $K$  знаходимо згідно [9], при  $B = 44$  і  $n = 0,7$ ;  $K = 3,2$ .

Тоді:

$$r = \frac{3,2 \cdot 91,8}{10000} = 0,029.$$

Таким чином знаходимо розрахункову кількість дощових вод з площі покрівлі  $Q$ , при  $k_R = 2$ :

$$Q = 2 \cdot 340 \cdot 0,029 = 19,72 \text{ (л/с)}.$$

За умови часу інтенсивності дощу, л/с тривалістю 20 хв., маємо:

$$Q_{\max} = 19,72 \cdot 60 \cdot 20 = 23,66 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Для перекачування такого обсягу води з малих ємностей в основний резервуар доцільніше використовувати відцентрові насоси малої потужності, але великої продуктивності, враховуючи, що подача води в насос буде здійснюватися при природному тиску води, що знаходиться в ємності.

Приймаємо для використання два насоси, продуктивність яких складе:

$$Q_{\max} / 2 = 19,72 / 2 = 9,86 \text{ (л/с)}.$$

Округлюючи, отримуємо потужність одного насоса 600 л/хв. (1,1 кВт).

Виходячи з цих даних, основний резервуар повинен мати обсяг щонайменше 25 м<sup>3</sup> (можливе встановлення двох і більше ємностей еквівалентних даному обсягу, з'єднаних між собою за принципом судин, що сполучаються).

Враховуючи конструкцію покрівлі, складено принципovu схему підключення і розташування обладнання (рис. 3).

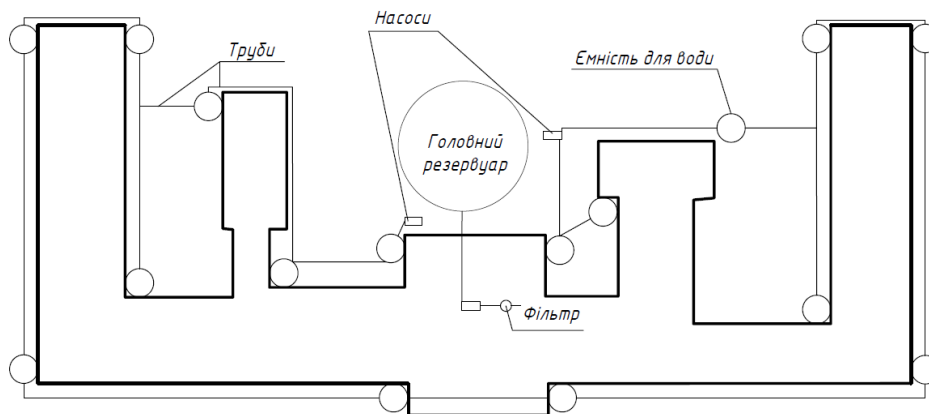


Рис. 3. Принципова схема підключення і розташування обладнання [6]

Схема передбачає використання 16 малих резервуарів, з яких вода буде перекачуватися до головної ємності. Розрахунки проводитимемо виходячи зі стандартних циліндроподібних вертикальних накопичувальних ємностей, діаметр яких становить 0,6 м.

Враховуючи, що нижній поріг забору води насосами складає не менше 0,2 м від дна всіх сполучених між собою 8 ємностей, визначаємо мінімальний необхідний обсяг води для включення насосів, отримуємо:

$$V = 0,2 \times 3,14 \times 0,32 \times 8 = 0,45 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Після накопичення саме такого обсягу вмикаються насоси і перекачують воду до головного резервуару.

За умови, що максимальна кількість стоків води відповідає продуктивності насосів, швидкість наповнення ємностей буде відповідати швидкості перекачування води в основний резервуар.

Виходячи з цих умов, приходимо до висновку, що достатнім об'ємом для малих ємностей буде об'єм – 250 л.

Таким чином, максимальний резерв накопиченої води складе:

$$V_{\text{рез.}} = 16 \times 0,25 + 25 = 29 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Розташування труб, насосів і головного резервуару може бути різним, за умови мінімального віддалення один від одного.

Основний резервуар (або кілька сполучених між собою), потрібно розміщувати у підвальному приміщенні або під землею.

Під землею ємності зберігають низьку температуру води і виключають потрапляння УФ променів, що сприяє мінімальному зростанню бактерій та мікроорганізмів у воді [11].

Але при цьому обов'язково необхідно встановити озонатор в основний накопичувач, який максимально

запобігатиме розвитку мікроорганізмів у воді.

У ході дослідження було визначено особливості підключення та встановлення вузлів системи збору та використання дощової води:

- Встановлення сіток грубої очистки між трубами водостоку та ємністю (сітка або «лійка» із вбудованою сіткою 200–500 мкм).

- Встановлення насосів необхідно передбачати у місцях, що забезпечують роботу електроприладів за умови дотримання правил техніки безпеки.

- Перед насосами обов'язкове встановлення зворотних клапанів та захисту від сухого ходу. Також необхідна установка автоматичних вимикачів для кожного насоса окремо.

- Сполучення ємностей між собою повинно здійснюватися трубами діаметром не менше 1,5 дюйма (38,1 мм).

- Основний резервуар повинен мати аварійний переливний дренаж для скидання води в каналізацію (при переповненні бака), за умови його встановлення під землю або підвальне приміщення.

- Робота насосів може здійснюватися як у ручному, так і в автоматичному режимі (із застосуванням електропоплавків або реле контролю рівня рідини).

- Також необхідно забезпечити вільний доступ для внутрішньої та зовнішньої поверхні резервуарів та насосів для обслуговування, миття, ремонтних та сервісних робіт тощо.

Дощова вода вважається відносно чистою. Порівняно з поверхневими та підземними водами дощова має майже нейтральний рН, відсутність жорсткості та будь-яких побічних продуктів дезінфекції. Однак на фізичні, хімічні та мікробіологічні характеристики стоку покрівлі першого змиву та зібраної дощової води сильно впливають характеристики водозбору, властивості матеріалу для зберігання та умови навколишнього середовища [6].

Подальше очищення та використання зібраної води може здійснюватися різними способами в залежності від призначення.

Побутове використання такої води буде суттєво зменшувати споживання водопровідної води. Зібрана вода може потрапляти до основної мережі методом врізки в основну систему, або паралельним водоводом за допомогою одного або декількох насосів в залежності від пікового навантаження.

При використанні в технічних цілях (полив, миття приміщення або посуду, туалети, прання тощо) потребує незначного очищення звичайними фільтрами, які затримують механічні домішки з автопромиванням або без. Таких способів фільтрації існує декілька. Обирати конкретну систему очищення необхідно з огляду на кількість використання води при максимальних потребах.

У майбутньому проєктування систем збору дощової води може виконуватися з використанням ВІМ-технологій. Інформаційна модель забезпечує точне визначення параметрів водозбору, схем трубопроводів, резервуарів, вузлів підключення та їх узгодження з іншими інженерними мережами. Застосування ВІМ дає можливість уникнути технічних колізій, скоротити витрати матеріалів і підвищити керованість проєктом. Як зазначено в [13], ВІМ розглядається як основа для організаційно-технологічного управління будівельними процесами, що робить його використання у водозбірних системах логічним продовженням розвитку.

За умови використання дощової води як питної та для приготування їжі, її потрібно доочистити від різних домішок. Окрім зважених твердих речовин, дощова вода може містити в собі незначні шкідливі для людини домішки, які вже перебували у воді, або утворилися під час контакту з покрівлею та іншими матеріалами, які використовувались під час збору та зберігання. До таких домішок належать сульфати, нітрати, хлориди, кишкова паличка та інші види бактерій і вірусів, тощо.

З огляду на різноманіття забруднюючих речовин у воді та сучасні можливості очищення, найефективнішим рішенням є використання фільтрів на основі зворотного

осмосу. Технологія здатна забезпечити комплексне очищення води, що робить її актуальною для побутового застосування. Завдяки такому фільтру можна з мінімальними витратами ресурсів отримати очищену воду, що відповідає світовим стандартам якості.

Враховуючи мінімальний вміст солей у дощовій воді (близько 20–70 мг/л), її можна повністю очистити від незначної кількості шкідливих домішок за допомогою даного фільтра, повертаючи за допомогою рециркуляції концентрат назад у ємність до критичного вмісту домішок.

Зважаючи на осад з частинок механічних забруднень і залишковий концентрат при доочищенні води, що становитиме не більше 10 %, отримаємо очищеної питної води на рік.

$$Q = 134,64 \times 0,9 = 121,18 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Фільтр на основі зворотного осмосу обирається залежно від необхідних потужностей водоочищення.

Можливі варіанти комплексного використання зібраної води, де частина буде застосовуватися для господарських потреб, а частина для пиття, приготування їжі.

### Висновки

Опади є важливим і майже невичерпним природним ресурсом, за допомогою якого ми можемо досягти покращення та полегшення нашої життєдіяльності. Особливо гостро

постає це питання у воєнний час, коли багато регіонів залишилися без доступу до водних ресурсів. Люди змушені заощаджувати на найголовнішому, без чого неможливо прожити – воді.

Хоча переваги збору дощової води були добре задокументовані, їхнє впровадження є дещо спорадичним. Останні тенденції зосереджені на вирішенні цього питання, демонструючи багатоцільовий характер з точки зору його екологічних, фінансових і соціальних переваг.

Децентралізований характер багатьох систем по збору дощової води пропонує унікальну можливість для громад брати активну участь в управлінні водними ресурсами, що дає численні переваги. Цей метод часто використовується як частина систематичного підходу до управління стічними водами, заснованого на водозборі, де кілька дренажних систем використовуються для цілісного управління стоком поверхневих вод.

Для забезпечення широкого впровадження систем збору та використання дощової води, необхідно розвивати нормативну базу в цьому напрямку. Нормативні акти повинні включати не лише технічне та екологічне керівництво, але й економічну та соціальну складову, щоб такі проекти мали підтримку на державному та місцевому рівнях.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зелінський С. Е. Водопостачання та водна безпека у контексті російської агресії. URL: <https://www.irf.ua/wp-content/uploads/2022/05/vodopostachannya-ta-vodna-bezpeka-u-konteksti-rosijskoyi-agresiyi.pdf> (дата звернення : 09.11.2025).
2. Збираємо та використовуємо дощову воду. URL: <https://pp-budpostach.com.ua/ua/a147251-sobiraem-ispolzuem-dozhdevuyu.html> (дата звернення : 09.11.2025).
3. Глушенко Р., Ткаченко Т. Збереження, якість та використання дощової води після «зеленої» покрівлі. Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2023. URL: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.4-12>
4. Gatta G. D., Birch W. D., Rotiroti N. Reinvestigation of the crystal structure of the zeolite gobbinsite : A single-crystal X-ray diffraction study. *American Mineralogist*. 2010. Vol. 95, № 4. Pp. 481–486. URL: <https://doi.org/10.2138/am.2010.3390> (дата звернення : 04.09.2025).
5. Efficient Aerial Water Harvesting with Self-Sensing Dynamic Janus Crystals. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jacs.4c11689> (дата звернення : 09.11.2025).
6. Raimondi A., Quinn R., Abhijith G. R., Becciu G., Ostfeld A. Rainwater Harvesting and Treatment : State of the Art and Perspectives. *Water*. 2023. Vol. 15, № 8. URL: <https://doi.org/10.3390/w15081518>
7. Клімат Запоріжжя : опади, температура, графіки. URL: <https://www.climate.top/ukraine/zaporizhia/graphs/> (дата звернення : 09.11.2025).

8. Транспортний колапс і підтоплення будівель : сьогодні в Запоріжжі випала майже двомісячна норма опадів. URL: <https://1news.zp.ua/ru/transportnyj-kollaps-i-podtoplenie-zdanij-segodnya-v-zaporozhe-vypala-pochti-dvухmesyachnaya-norma-osadkov-foto-video> (дата звернення : 09.11.2025).

9. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. Київ : Мінрегіон, 2012.

10. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ : Мінрегіон, 2013.

11. Глушенко Р., Ткаченко Т. Збереження, якість та використання дощової води після «зеленої» покрівлі. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2023. № 42. С. 4–12. URL: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.4-12>

12. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. URL: <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/297637>

13. Іваненко Д. С., Кулік М. В., Бобраков А. А., Москальова А. В. BIM як база для механізму управління будівельними проектами. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. № 42. DOI: 10.31713/budres.v0i42.020.

## REFERENCES

1. Zelinskyi S.E. *Vodopostachannia ta vodna bezpeka u konteksti rosijskoi ahresii* [Water supply and water security in the context of Russian aggression]. URL: <https://www.irf.ua/wp-content/uploads/2022/05/vodopostachannya-ta-vodna-bezpeka-u-konteksti-rosijskovyi-agresiyi.pdf> (accessed : 09.11.2025). (in Ukrainian).

2. *Zbiraemo ta vykorystovuiemo doshchovu vodu* [Collecting and using rainwater]. URL: <https://pp-budpostach.com.ua/ua/a147251-sobiraem-ispolzuem-dozhdevuyu.html> (accessed : 09.11.2025). (in Ukrainian).

3. Hlushchenko R. and Tkachenko T. *Zberezhennia, yakist ta vykorystannia doshchovoi vody pislia “zelenoi” pokrivli* [Preservation, quality and use of rainwater after the “green” roof]. Kyiv : Kyiv National University of Construction and Architecture, 2023. URL: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.4-12> (in Ukrainian).

4. Gatta G.D., Birch W.D. and Rotiroti N. Reinvestigation of the crystal structure of the zeolite gobbinsite : A single-crystal X-ray diffraction study. *American Mineralogist*. 2010, vol. 95, no. 4, pp. 481–486. URL: <https://doi.org/10.2138/am.2010.3390> (accessed : 04.09.2025).

5. Efficient Aerial Water Harvesting with Self-Sensing Dynamic Janus Crystals. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jacs.4c11689> (accessed : 09.11.2025).

6. Raimondi A., Quinn R., Abhijith G.R., Becciu G. and Ostfeld A. Rainwater Harvesting and Treatment : State of the Art and Perspectives. *Water*. 2023, vol. 15, no. 8. URL: <https://doi.org/10.3390/w15081518>

7. *Klimat Zaporizhzhia : opady, temperatura, hrafiky* [Climate of Zaporizhzhia : precipitation, temperature, charts]. URL: <https://www.climate.top/ukraine/zaporizhia/graphs/> (accessed : 09.11.2025). (in Ukrainian).

8. *Transportnyi kollaps i pidtoplennia budivel : s'ohodni v Zaporizhzhii vypala maizhe dvomisiachna norma opadiv* [Transport collapse and flooding of buildings : today in Zaporizhzhia, almost a two-month rainfall rate fell]. URL: <https://1news.zp.ua/ru/transportnyj-kollaps-i-podtoplenie-zdanij-segodnya-v-zaporozhe-vypala-pochti-dvухmesyachnaya-norma-osadkov-foto-video> (accessed: 09.11.2025). (in Ukrainian).

9. *DBN V.2.5-64:2012. Vnutrishnii vodoprovod ta kanalizatsiia. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo* [Internal water supply and sewerage. Part I. Design. Part II. Construction]. Kyiv : Minrehion, 2012. (in Ukrainian).

10. *DBN V.2.5-74:2013. Vodopostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia* [Water supply. External networks and facilities. Basic design requirements]. Kyiv : Minrehion, 2013. (in Ukrainian).

11. Hlushchenko R. and Tkachenko T. *Zberezhennia, yakist ta vykorystannia doshchovoi vody pislia “zelenoi” pokrivli* [Preservation, quality and use of rainwater after the “green” roof]. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki* [Water Supply, Drainage and Hydraulic Problems]. 2023, no. 42, pp. 4–12. URL: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.4-12> (in Ukrainian).

12. *DSTU-N B V.1.1-27:2010. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivelnna klimatolohiia* [Protection against hazardous geological processes... Construction climatology]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2010. (in Ukrainian).

13. Ivanenko D.S., Kulik M.V., Bobrakov A.A. and Moskalova A.V. *BIM yak baza dlya mekhanizmu upravlinnya budivel'nymy proyektamy* [BIM as a basis for the mechanism of construction project management]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyyi, budivli ta sporudy* [Resource-Efficient Materials, Structures, Buildings, and Facilities]. 2022, no. 42. DOI: 10.31713/budres.v0i42.020. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 10.03.2026.

Прийнято після рецензування: 12.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 624.014.2:624.042.4

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.108.1247

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КАРКАСУ КАПСУЛЬНОГО БУДИНКУ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

КУШНІР І. О.<sup>1\*</sup>, асп.,

ВОЛКОВА В. Є.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, проф.

<sup>1\*</sup>Кафедра будівельної механіки та металевих конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: [kushnir27@gmail.com](mailto:kushnir27@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-3844-6261>

<sup>2</sup> Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [drvev09@gmail.com](mailto:drvev09@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1883-1385>

**Анотація. Постановка проблеми.** Зростання попиту на мобільні житлові рішення, особливо в контексті післявоєнної відбудови України, зумовлює необхідність розвитку вітчизняного виробництва капсульних будинків. Несучим елементом таких споруд є сталевий каркас, розрахунок якого потребує застосування сучасних методів чисельного моделювання для забезпечення міцності, стійкості, жорсткості при дії експлуатаційних навантажень. Актуальним є питання пошуку раціональних форм та розмірів перерізів несучих елементів з метою зниження металоємності без втрати необхідного рівня надійності. **Мета** полягає у дослідженні напружено-деформованого стану каркасу капсульного будинку за допомогою методу скінчених елементів при експлуатаційних навантаженнях, дослідженні збіжності результатів чисельного розрахунку та обґрунтуванні можливості уточнення профілів несучих елементів. **Методика.** Виконано тривимірне моделювання просторового каркасу габаритами 11452×3140×3230 мм та масою 3,1 т у програмному комплексі Autodesk Inventor 2024 із застосуванням модуля Simulation 2020. Проведено аналіз збіжності результатів шляхом послідовного подрібнення скінченно-елементної сітки. Переміщення контролювались у 12 характерних точках вздовж поздовжньої осі каркасу. Досліджено експлуатаційне навантаження інтенсивністю 4 кПа. **Результати.** Встановлено коефіцієнт запасу міцності  $n = 2,75$ , що свідчить про надлишкову металоємність конструкції. Максимальні переміщення становлять 7,8 мм, що значно менше граничних  $L/200 = 57$  мм. Збіжність результатів підтверджена при зменшенні розміру елементів сітки з 20 мм до 10 мм з відхиленням менше 2 %. Обґрунтовано можливість заміни вертикальних стійок перерізом 100×100×4 мм на профілі 100×100×3 мм із зменшенням маси на 12 %. **Наукова новизна** полягає в комплексному підході до дослідження напружено-деформованого стану легкого металевих каркасу з гнuto-зварних профілів замкнутого перерізу. **Практична значущість.** Результати можуть бути використані при проектуванні та серійному виробництві мобільних житлових модулів в Україні, а запропонована методика верифікації - при розрахунку аналогічних тонкостінних каркасних конструкцій.

**Ключові слова:** капсульний будинок; метод скінчених елементів; легкі сталеві конструкції; напружено-деформований стан; збіжність розрахунку; уточнення профілю; раціоналізація

## NUMERICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF CAPSULE HOUSE FRAME UNDER OPERATIONAL LOADS AND SUBSTANTIATION OF PROFILE THINNING

KUSHNIR I.O.<sup>1\*</sup>, Postgrad. Stud.,

VOLKOVA V.Yev.<sup>2</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.

<sup>1\*</sup> Department of Structural Mechanics and Metal Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: [kushnir27@gmail.com](mailto:kushnir27@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-3844-6261>

<sup>2</sup> Dnipro State Agrarian and Economic University, 25, S. Yefremov St., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: [drvev09@gmail.com](mailto:drvev09@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1883-1385>

**Abstract. Statement of the problem.** The growing demand for mobile housing solutions, particularly in the context of post-war reconstruction of Ukraine, necessitates the development of domestic production of capsule houses. The load-bearing element of such structures is a steel frame, the design of which requires the application of modern numerical modeling methods to ensure strength, stability, and stiffness under operational loads. The search for rational shapes and

cross-sectional dimensions of load-bearing elements to reduce steel consumption without compromising the required level of reliability is a relevant issue. The objective is to investigate the stress-strain state of a capsule house frame using the finite element method under operational loads, to study the convergence of numerical results, and to substantiate the feasibility of profile thinning for load-bearing elements. **Methodology.** Three-dimensional modeling of a spatial frame with overall dimensions of 11452×3140×3230 mm and a mass of 3.1 t was performed using Autodesk Inventor 2024 with the Simulation 2020 module. Convergence analysis was carried out through successive refinement of the finite element mesh. Displacements were monitored at 12 characteristic points along the longitudinal axis of the frame. An operational load with an intensity of 4 kPa was investigated. **Results.** A strength safety factor of  $n = 2.75$  was determined, indicating excessive steel consumption of the structure. Maximum displacements were 7.8 mm, which is significantly below the allowable limit of  $L/200 = 57$  mm. Convergence of results was confirmed when the mesh element size was reduced from 20 mm to 10 mm, with a deviation of less than 2 %. The feasibility of replacing vertical posts with a 100×100×4 mm cross-section with 100×100×3 mm profiles was substantiated, resulting in a 12 % mass reduction. **The scientific novelty** lies in the comprehensive approach to investigating the stress-strain state of a lightweight steel frame made of cold-formed welded hollow sections. **Practical significance.** The results can be used in the design and serial production of mobile housing modules in Ukraine, and the proposed verification methodology can be applied to the analysis of similar thin-walled framed structures.

**Keywords:** capsule house; finite element method; lightweight steel structures; stress-strain state; calculation convergence; profile thinning; rationalization

**Постановка проблеми.** Потреба у мобільних та швидкокомтованих житлових конструкціях непинно зростає на світовому будівельному ринку. За даними Modular Building Institute [1], обсяг встановлених модульних будівель у США у 2024 р. зріс на 31 % порівняно з попереднім роком, що свідчить про глобальну тенденцію переходу до індустріальних методів будівництва.

Для України розвиток капсульного будівництва набуває особливого значення з огляду на потребу оперативного відновлення зруйнованого житлового фонду. Традиційний імпорт готових модулів обмежується логістичними труднощами, тривалими термінами постачання та невідповідністю місцевим кліматичним умовам експлуатації.

Несучим елементом капсульного будинку є сталевий каркас, який повинен забезпечувати міцність, жорсткість та стійкість при дії комплексу навантажень: експлуатаційних, снігових, вітрових, а також динамічних впливів при транспортуванні та монтажі. Верифікація несучої здатності такого каркасу потребує застосування сучасних методів чисельного моделювання.

**Аналіз публікацій.** Основні проблеми проектування модульних сталевих конструкцій висвітлена у роботах Lawson R. M. та Ogden R. G. [2], які обґрунтували принципи оптимізації маси та забезпечення транспортабельності. Автори

зазначають, що несучі елементи модулів нерідко мають надлишкову металоємність, оскільки їх розміри визначаються переважно вимогами стійкості при підніманні та транспортуванні, а не лише експлуатаційними навантаженнями. На основі досвіду реалізованих проєктів у Великобританії обґрунтовано ефективність гібридного підходу, що поєднує тривимірні модулі з двовимірними панельними системами для оптимізації матеріалоємності та функціональної гнучкості будівель.

Yu C. та Schafer B. W. [3] дослідили особливості втрати стійкості холодногнутих профілів під дією згинальних навантажень. Авторами виконано серії експериментальних випробувань стандартних C- та Z-подібних перерізів, що дозволило встановити верхні та нижні межі несучої здатності при різних формах втрати місцевої та дисторсійної стійкості. На основі отриманих результатів розроблено скінченно-елементні моделі в програмному комплексі ABAQUS та запропоновано вдосконалення методу прямої міцності (Direct Strength Method) для проєктування тонкостінних сталевих елементів.

Pan W. та Gibb A. G. F. [4] проаналізували переваги позамайданчикowego виробництва будівельних конструкцій з позиції швидкості зведення та контролю якості. Автори довели, що традиційні методи оцінки ефективності позамайданчикowego виробництва є

недостатніми, оскільки враховують лише прямі витрати на матеріали та робочу силу, ігноруючи такі суттєві фактори як охорона праці, управлінські та процесні переваги. На основі серії виробничих кейсів обґрунтовано необхідність переходу від витратного до ціннісного підходу при порівнянні заводського та традиційного будівництва.

Jaillon L. та Poon C. S. [5] дослідили вплив префабрикації на обсяги будівельних відходів на прикладі висотних житлових будівель у Гонконзі. За результатами анкетування фахівців та аналізу реалізованих проєктів встановлено середнє зменшення будівельних відходів на 52 % при застосуванні збірних конструкцій порівняно з традиційним будівництвом. Отримані дані підтверджують екологічну ефективність заводського виготовлення конструкцій та доцільність розширення сфери застосування модульних технологій.

Методи розрахунку тонкостінних елементів систематизовані Dubina D. [6] та Rhodes J. [7]. Dubina D. [6] у фундаментальній роботі з проєктування холодногнутих сталевих конструкцій за Єврокодом 3 систематизував форми втрати стійкості тонкостінних елементів - місцеву, дисторсійну та загальну - та навів методики їх урахування при розрахунку за методом ефективних ширин. Особливу увагу приділено впливу холодного формування на механічні властивості сталі та взаємодії різних форм втрати стійкості у складених перерізах.

Rhodes J. [7] дослідив поведінку тонкостінних конструкцій з позиції закритикальної роботи пластинчастих елементів після втрати місцевої стійкості. У його роботах розглянуто взаємодію місцевої та загальної форм втрати стійкості, а також застосування методу скінчених смуг для аналізу тонкостінних елементів у будівельних та інженерних конструкціях.

Вітчизняні напрацювання представлені дослідженнями Білика С. І. [8] щодо просторової роботи стержневих систем. Білик С. І. [8], доктор технічних наук, завідувач кафедри металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА, розробив підходи до

проєктування раціональних сталевих каркасів будівель зі змінними перерізами елементів, що дозволяють знизити металоємність конструкцій. Його дослідження охоплюють аналіз просторової жорсткості та стійкості каркасних систем з урахуванням реальних умов експлуатації.

Перельмутер А. В. [9] розглянув питання надійності каркасних конструкцій та розрахункових моделей споруд. У його працях обґрунтовано підходи до формування адекватних розрахункових схем, застосування часткових коефіцієнтів надійності та аналізу напружено-деформованого стану конструкцій з використанням сучасних програмних комплексів, зокрема SCAD Office.

Юрченко В. В. [10] запропонувала методику удосконалення конструктивної форми легких каркасів будівель із холодногнутих профілів шляхом розв'язання задач оптимального проєктування. Її дослідження спрямовані на зниження металоємності стрижневих конструкцій за рахунок параметричної оптимізації поперечних перерізів елементів з одночасним дотриманням вимог міцності, стійкості та жорсткості за нормами Єврокоду.

Проте комплексний аналіз напружено-деформованого стану каркасів капсульних будинків з урахуванням монтажних операцій залишається недостатньо вивченим.

**Мета статті** – дослідження напружено-деформованого стану сталевих просторових каркасів капсульного будинку методом скінчених елементів при експлуатаційних навантаженнях, дослідження збіжності чисельного розв'язку, виявлення зон концентрації напружень та обґрунтування можливості утончення профілів несучих елементів.

**Виклад матеріалу.** Об'єктом дослідження є капсульний будинок (рис. 1), призначений для тимчасового або постійного проживання. Конструктивна схема передбачає просторовий каркас із холодногнутих замкнених профілів.



Рис. 1. Загальний вигляд капсульного будинку

Просторовий каркас (рис. 2) має габаритні розміри 11452×3140×3230 мм та масу 3,1 т. Конструкція складається з верхньої та нижньої обв'язок, вертикальних стійок, поперечних розпірок, фланцевих з'єднань та підсилювальних елементів (косинок і ребер жорсткості).

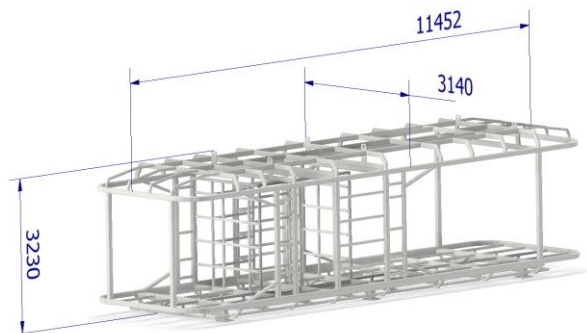


Рис. 2. Просторовий каркас капсульного будинку

З метою уніфікації виробництва прийнято 5 типорозмірів гнutoзварних профілів: 120×120×4, 150×100×4, 100×100×4, 100×50×3 та 50×50×2 мм. Матеріал - сталь С245 (ДСТУ 8539:2015) з межею текучості  $\sigma_y = 245$  МПа.

Додатково використовуються сталеві пластини для виготовлення монтажних фланців, та елементів вузлів і з'єднань. Товщина та форма пластин розраховуються для забезпечення міцності та надійності з'єднань. Загальна маса елементів каркасу з урахуванням технологічних та транспортних вимог становить близько 2,65 т.

Чисельне моделювання виконано методом скінчених елементів (МСЕ) у програмному комплексі Autodesk Inventor 2024 із застосуванням модуля Simulation

2020 (рис. 3). Вибір МСЕ обумовлений необхідністю врахування складної просторової геометрії каркасу, нерівномірного розподілу жорсткості елементів та локальних особливостей вузлових з'єднань, що унеможливило застосування аналітичних методів розрахунку [9; 11].

Серед підходів до розрахунку каркасних конструкцій слід відзначити метод переміщень (метод жорсткостей), метод сил та метод граничної рівноваги [9]. Метод переміщень є основою більшості сучасних програмних комплексів для розрахунку конструкцій, проте його класична реалізація у стержневій постановці не дозволяє врахувати місцеві ефекти в тонкостінних перерізах - локальну та дисторсійну втрату стійкості стінок профілів [3; 6]. Об'ємне моделювання засобами МСЕ у поєднанні з оболонковими або тетраедричними елементами дозволяє виявити зазначені ефекти та отримати детальну картину розподілу напружень у всіх перерізах конструкції.

Дискретизація геометричної моделі каркасу виконана із застосуванням тетраедричних скінчених елементів другого порядку (параболічних) з 10 вузлами та 3 ступенями вільності у кожному вузлі (переміщення  $u, v, w$  за осями  $X, Y, Z$  відповідно). Тетраедричні елементи другого порядку обрано з огляду на їх здатність точніше апроксимувати криволінійні поверхні замкнених профілів порівняно з лінійними елементами першого порядку, а також забезпечувати вищу точність при меншій кількості елементів [13]. Кожний параболічний тетраедр має квадратичні функції форми, що дозволяє адекватно відтворювати лінійний розподіл деформацій всередині елемента.

Загальна кількість вузлів скінченно-елементної моделі становить приблизно 285 000, кількість елементів - близько 165 000. У зонах концентрації напружень (кутові з'єднання, місця приварювання косинок та ребер жорсткості) застосовано локальне подрібнення сітки до 5 мм.

Розв'язання задачі статичної рівноваги зводиться до системи алгебраїчних рівнянь [12]:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (1)$$

де  $[K]$  - глобальна матриця жорсткості системи;  $\{U\}$  - вектор вузлових переміщень;  $\{F\}$  - вектор вузлових навантажень.

Матрицю жорсткості всієї системи отримано шляхом ансамблювання матриць окремих елементів:

$$[K] = \sum [k_e], \quad (2)$$

де  $[k_e]$  - матриця жорсткості  $e$ -го скінченного елемента, що визначається інтегруванням по об'єму елемента:

$$[k_e] = \int [B]^T [D] [B] dV, \quad (3)$$

де  $[B]$  - матриця градієнтів (зв'язок деформацій з вузловими переміщеннями);  $[D]$  - матриця пружності матеріалу;  $V$  - об'єм елемента.

При моделюванні були використані наступні характеристики матеріалу елементів каркасу - сталь С245 (ДСТУ 8539:2015) з такими фізико-механічними характеристиками: масова густина  $\rho = 7,85 \text{ г/см}^3$ , межа текучості  $\sigma_y = 207 \text{ МПа}$ , тимчасовий опір розриву  $\sigma_b = 345 \text{ МПа}$ , модуль пружності  $E = 220 \text{ ГПа}$ , коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,275$ , модуль зсуву  $G = 86,3 \text{ ГПа}$ . Розрахунок виконано в пружній стадії роботи матеріалу.

Перевірку міцності здійснено із застосуванням критерію еквівалентних напружень Мізеса:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{0,5 \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}, \quad (4)$$

де  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - головні напруження. Коефіцієнт запасу міцності визначено як:

$$n = \sigma_y / \sigma_{eq,max}, \quad (5)$$

де  $\sigma_y$  - межа текучості матеріалу (245 МПа для сталі С245).

Розрахунок виконано для експлуатаційного навантаження інтенсивністю  $q = 4 \text{ кПа}$ , з урахуванням власної ваги конструкції, масу обладнання (системи опалення, водопостачання, електричне обладнання), корисне навантаження від меблів та людей відповідно

до ДБН В.1.2-2:2006 [14]. Навантаження прикладено у вигляді рівномірно розподіленого тиску на верхню обв'язку каркасу та передається через поперечні ригелі на вертикальні стійки.

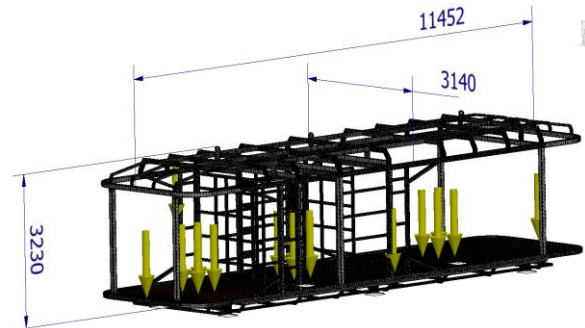


Рис. 3. Скінчено-елементна модель каркасу

Граничні умови прийнято у вигляді шарнірно-нерухомого закріплення опорних вузлів нижньої обв'язки, що моделює встановлення каркасу на фундаментні опори. Снігове та вітрове навантаження в даному дослідженні не враховувались, оскільки обтічна форма сприяє самоочищенню від снігу.

Для контролю достовірності результатів чисельного моделювання виконано аналіз збіжності розв'язку шляхом послідовного подрібнення скінченно-елементної сітки. Збіжність оцінювалась за зміною максимальних переміщень та напружень при зменшенні характерного розміру елемента  $h$  від 20 мм до 10 мм. Критерієм досягнення збіжності прийнято відносну зміну контрольованого параметра менше 2 % при подрібненні сітки:

$$\delta = |f_h - f_{h/2}| / f_{h/2} \times 100\% \leq 2\%, \quad (6)$$

де  $f_h$  - значення контрольованого параметра при розмірі елемента  $h$ ;  $f_{h/2}$  - значення при подрібненій сітці з розміром  $h/2$ . Слід зазначити, що надмірне подрібнення сітки (елементи менше 3 мм) може призводити до накопичення обчислювальних похибок, тому оптимальний розмір елемента обирався з урахуванням балансу між точністю та обчислювальними витратами [13].

Переміщення контролювались у 12 характерних точках, розташованих

рівномірно вздовж поздовжньої осі каркасу з кроком 1000 мм. Контрольні точки розміщено на верхній обв'язці каркасу у площині симетрії конструкції, що дозволяє побудувати криву прогинів по довжині каркасу та ідентифікувати зони максимальних деформацій.

Таблиця 1

**Результати розрахунку  
при експлуатаційному навантаженні**

Параметр	Мін.	Макс.
Маса, кг	3089,23	–
$\sigma$ Мізеса, МПа	0,0007	753,0
Переміщення, мм	0	7,80
Коеф. запасу $n$	2,75	15,0

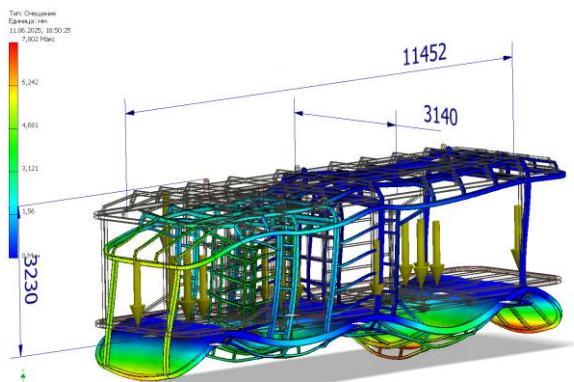


Рис. 4. Поле напружень при експлуатаційному навантаженні

Аналіз результатів (табл. 1, рис. 4) свідчить про значний запас несучої здатності конструкції. Напруження в контрольних точках нижче границі плинності матеріалу у 2,75 рази. Максимальні переміщення  $f_{\max} = 7,8$  мм не перевищують граничних  $[f] = L/200 = 11452/200 = 57$  мм, що відповідає вимогам жорсткості за ДБН В.1.2-2:2006 [14]. Максимальне еквівалентне напруження за Мізесом  $\sigma_{\text{eq,max}} = 89,1$  МПа зафіксовано в зоні з'єднання вертикальної стійки з нижньою обв'язкою у середній частині каркасу.

Розподіл переміщень вздовж поздовжньої осі каркасу у 12 контрольних точках свідчить про параболічний характер прогинової кривої з максимумом у середній третині прольоту. Переміщення в крайніх точках (вузли опирання) близькі до нуля, у точках 5–8 (середня частина) становлять 6,2–7,8 мм, у точках 3–4 та 9–10 – 3,1–4,7 мм.

Отриманий характер розподілу відповідає роботі балкової системи під рівномірним навантаженням, що підтверджує адекватність прийнятих граничних умов.

Результати аналізу збіжності чисельного розв'язку наведено у таблиці 2. При зменшенні розміру елемента сітки від 20 мм до 10 мм відносна зміна максимальних переміщень становила 3,8 %, а при подальшому подрібненні до 5 мм – лише 1,4 %, що задовольняє прийнятий критерій збіжності (6). Для максимальних напружень відхилення між сітками 10 мм та 5 мм не перевищує 1,9 %. Це підтверджує достатню точність прийнятої дискретизації з базовим розміром елемента 10 мм.

Таблиця 2

**Результати аналізу збіжності**

$h$ , мм	$f_{\max}$ , мм	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\delta$ , %
20	7,51	85,3	–
10	7,80	89,1	3,8
5	7,91	90,8	1,4

Значний запас міцності вказує на можливість раціоналізації перерізів окремих елементів каркасу. Найбільш доцільним є утончення вертикальних стійок, виконаних з профілю 100×100×4 мм, оскільки рівень напружень у цих елементах не перевищує 45–60 МПа, що становить лише 18–24 % від межі текучості.

Для обґрунтування утончення виконано додатковий розрахунок із заміною профілю стійок на 100×100×3 мм. Площа поперечного перерізу при цьому зменшується з 14,44 см<sup>2</sup> до 11,04 см<sup>2</sup> (на 23,5 %), а момент інерції – з 254,7 см<sup>4</sup> до 199,1 см<sup>4</sup> (на 21,8 %). Маса стійок зменшується з 11,34 кг/м до 8,66 кг/м, що при загальній довжині стійок забезпечує зниження маси каркасу на 12 %.

Результати розрахунку з утонченими стійками показали збільшення максимальних напружень до 112,4 МПа та переміщень до 9,3 мм, що не перевищує межу текучості матеріалу. Максимальні переміщення 9,3 мм становлять лише 16 % від граничних  $[f] = 57$  мм, що задовольняє вимоги жорсткості. Таким чином, заміна профілю 100×100×4 мм на 100×100×3 мм є обґрунтованою з точки

зору несучої здатності та жорсткості при експлуатаційних навантаженнях.

Слід зазначити, що при утонченні профілю необхідно додатково перевірити місцеву стійкість стінок перерізу. Для профілю  $100 \times 100 \times 3$  мм відношення ширини стінки до товщини становить  $b/t = (100 - 2 \times 3) / 3 = 31,3$ , що не перевищує граничне значення  $42\epsilon = 42 \times \sqrt{(235/245)} = 41,1$  відповідно до Eurocode 3 (EN 1993-1-1) [15] та ДБН В.2.6-198:2014 [11]. Отже, переріз належить до класу 3 й може працювати в пружній стадії без обмежень.

### Висновки

1. Побудовано просторову скінченно-елементну модель каркасу капсульного будинку з використанням параболічних тетраєдрів та досліджено його роботу під експлуатаційним навантаженням 4 кПа.

2. Встановлено достатній запас міцності обраних перерізів при максимальних еквівалентних напруженнях за Мізесом

89,1 МПа. Максимальні переміщення 7,8 мм становлять лише 14 % від граничних  $L/200 = 57$  мм.

3. Підтверджено збіжність чисельного розв'язку: при подрібненні сітки від 20 мм до 5 мм відносна зміна контрольованих параметрів не перевищує 2 %, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

4. Обґрунтовано можливість зменшення товщини стінок перерізу для вертикальних стійок з профілю  $100 \times 100 \times 4$  мм на  $100 \times 100 \times 3$  мм зі зменшенням маси каркасу на 12 % та виконанні вимог місцевої стійкості стінок перерізу.

5. Результати підтверджують придатність каркасу до серійного виробництва за умови впровадження запропонованих рекомендацій щодо раціоналізації перерізів. Перспективним напрямком подальших досліджень є аналіз монтажних та транспортних навантажень, а також оцінка аварійних режимів роботи конструкції.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Modular Building Institute. 2024 Permanent Modular Construction Report. Charlottesville : MBI, 2024. 48 p.
2. Lawson R. M., Ogden R. G. Modular construction using light steel framing: an architect's guide. Ascot : SCI, 2008. 92 p.
3. Yu C., Schafer B. W. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of Structural Engineering*, 2006. Vol. 132, № 4. Pp. 515–528.
4. Pan W., Gibb A. G. F. Perspective of UK housebuilders on the use of offsite modern methods of construction. *Construction Management and Economics*. 2008. Vol. 26, № 6. Pp. 656–675.
5. Jaillon L., Poon C. S. Sustainable construction aspects of using prefabrication in dense urban environment. *Construction Management and Economics*. 2008. Vol. 26, № 9. Pp. 953–966.
6. Dubina D. Structural analysis and design assisted by testing of cold-formed steel structures. *Thin-Walled Structures*. 2008. Vol. 46, № 7–9. Pp. 741–764.
7. Rhodes J. Design of cold formed steel members. London : Elsevier Applied Science, 1991. 302 p.
8. Білик С. І. Просторова робота тонкостінних стержневих систем. Київ : НАУ, 2013. 348 с.
9. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчётные модели сооружений и возможность их анализа. Київ : Сталь, 2007. 600 с.
10. Юрченко В. В. Удосконалення конструктивної форми легких каркасів будівель із холодногнутих профілів на базі рішення задачі оптимального проектування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Київ : КНУБА, 2019. 44 с.
11. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ : Мінрегіон України, 2014. 199 с.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. 1975. 541 с.
13. Bathe K. J. Finite Element Procedures. 2nd ed. Watertown : Klaus-Jürgen Bathe, 2014. 1043 p.
14. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : Мінбуд України, 2006. 78 с.
15. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels : CEN, 2005. 91 p.

### REFERENCES

1. Modular Building Institute. 2024 Permanent Modular Construction Report. Charlottesville : MBI, 2024, 48 p.
2. Lawson R.M. and Ogden R.G. Modular construction using light steel framing : an architect's guide. Ascot : SCI, 2008, 92 p.

3. Yu C. and Schafer B.W. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of Structural Engineering*. 2006, vol. 132, no. 4, pp. 515–528.
4. Pan W. and Gibb A.G.F. Perspective of UK housebuilders on the use of offsite modern methods of construction. *Construction Management and Economics*. 2008, vol. 26, no. 6, pp. 656–675.
5. Jaillon L. and Poon C.S. Sustainable construction aspects of using prefabrication in dense urban environment. *Construction Management and Economics*. 2008, vol. 26, no. 9, pp. 953–966.
6. Dubina D. Structural analysis and design assisted by testing of cold-formed steel structures. *Thin-Walled Structures*. 2008, vol. 46, no. 7–9, pp. 741–764.
7. Rhodes J. *Design of cold formed steel members*. London : Elsevier Applied Science, 1991, 302 p.
8. Bilyk S.I. *Prostorova robota tonkostinnykh strzhnevnykh system* [Spatial behavior of thin-walled rod systems]. Kyiv : NAU, 2013, 348 p. (in Ukrainian).
9. Perelmuter A.V. and Slivker V.I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Calculation models of structures and possibility of their analysis]. Kyiv : Stal, 2007, 600 p. (in Russian).
10. Yurchenko V.V. *Udoskonalennia konstruktyvnoi formy lehkykh karkasiv budivel iz kholodnohnutykh profiliv na bazi rishennia zadachi optimalnoho proektuvannia : avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.01* [Improvement of structural form of lightweight building frames from cold-formed profiles based on optimal design : Dr. Sc. thesis abstract : 05.23.01]. Kyiv : KNUCEA, 2019, 44 p. (in Ukrainian).
11. *DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia* [DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design standards]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2014, 199 p. (in Ukrainian).
12. Zienkiewicz O.C. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in engineering science]. 1975, 541 p. (in Russian).
13. Bathe K.J. *Finite Element Procedures*. 2nd ed. Watertown : Klaus-Jürgen Bathe, 2014, 1043 p.
14. *DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia* [DBN V.1.2-2:2006. Loads and effects. Design standards]. Kyiv : Minbud Ukrainy, 2006, 78 p. (in Ukrainian).
15. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1 : General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2005, 91 p.

Надійшла до редакції: 01.04.2026.

Прийнято після рецензування: 24.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 692

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.116.1248

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ СПОСОБУ СПОРУДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ СТІН БУДІВЕЛЬ МОНОЛІТНО-КАРКАСНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

НЕСЕВРЯ П. І.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
НЕЧЕПУРЕНКО Д. С.<sup>2\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ДАНИЛЕНКО І. О.<sup>3</sup>, асп.

<sup>1</sup> Кафедра технологій будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 770-79-21, e-mail: [nesevrya.pavlo@pdaba.edu.ua](mailto:nesevrya.pavlo@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-2371-7381>

<sup>2\*</sup> Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 380-27-74, e-mail: [nechepurenko.daria@pdaba.edu.ua](mailto:nechepurenko.daria@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-9292-4790>

<sup>3</sup> Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 279-76-38, e-mail: [danylenko.ihor@365.pdaba.edu.ua](mailto:danylenko.ihor@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-1055-1503>

**Анотація. Постановка проблеми.** Збільшення частки висотних будівель, що побудовані за технологією монолітно-каркасного будівництва з кожним роком більшає. Основними перевагами будівель монолітно-каркасної конструкції, перед цегляними, збірно-монолітними та панельними багатоповерхівками є: висока швидкість будівництва, оптимальні витрати праці на будівництво, вільне планування квартир, оптимальна вартість житла, полегшена конструкція, правильна геометрія і висока міцність залізобетонних конструкцій, відсутність усадки залізобетонних конструкцій. Одним з етапів зведення будівлі за монолітно-каркасною технологією є зведення зовнішніх несучих стін. Наразі основними матеріалами для зведення зовнішніх несучих стін є: цегла, газоблок, керамоблок. Деякі з цих матеріалів відносно важкі, деякі недостатньо міцні. Слід зазначити, що технологія за якою виконують спорудження зовнішніх несучих стін, вимагає ручної праці мулярів. Ручна праця не відповідає стратегії механізації будівельних робіт, витрати на заробітну плату мулярів, на пряму мають вплив на вартість одиниці об'єму зовнішньої стіни багатоповерхівки монолітно-каркасної конструкції. **Мета статті:** оглянути теоретичні положення та практичні рекомендації щодо обґрунтованого вибору технологій заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних споруд, окреслити межі дослідження розробки алгоритму доцільності вибору матеріалів заповнення відносно окремих факторів вибору, окреслити межі дослідження можливості використання технологій будівельного 3D-друку у процесі заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель та фактори вибору даної технології при заповненні. **Об'єкт дослідження.** Технологія зведення несучих зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель та визначення межі використання технологій будівельного 3D-друку для виконання заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель. **Предмет дослідження.** Процеси заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних споруд, проблеми та методи вирішення існуючих проблем заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель. **Висновок.** На основі проведеного аналізу, розглянуто та обґрунтовано альтернативу ручної праці – технологію будівельного 3D-друку, а також визначено умови, при яких доцільно використовувати цю технологію у процесі спорудження зовнішніх несучих стін монолітно-каркасних будівель.

**Ключові слова:** технологія монолітно-каркасного будівництва; зовнішні несучі стіни; технології будівельного 3D-друку; технології заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних споруд; технологія зведення несучих зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель

## PROBLEM STATEMENT ON THE EXTERIOR WALL ERECTION METHODS IN REINFORCED CONCRETE FRAME BUILDINGS

NESEVRIA P.I.<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
NECHEPURENKO D.S.<sup>2\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
DANYLENKO I.O.<sup>3</sup>, PhD Stud.

<sup>1</sup> Department of Construction Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 770-79-21, e-mail: [nesevrya.pavlo@pdaba.edu.ua](mailto:nesevrya.pavlo@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-2371-7381>

<sup>2\*</sup> Department of Construction Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 380-27-74, e-mail: [Nechepurenko.daria@pdaba.edu.ua](mailto:Nechepurenko.daria@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-9292-4790>

<sup>3</sup> Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 279-76-38, e-mail: [danylenko.ihor@365.pdaba.edu.ua](mailto:danylenko.ihor@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-1055-1503>

**Abstract. Problem statement.** The share of high-rise buildings constructed using cast-in-place reinforced concrete frame technology is steadily increasing in Ukraine. Compared with brick, precast-monolithic, and panel systems, reinforced concrete frame buildings offer several advantages: high construction speed, optimized labor input, flexible apartment layouts, favorable cost efficiency, reduced structural weight, accurate geometry, high strength of reinforced concrete elements, and the absence of shrinkage. One of the key stages in erecting such buildings is the construction of exterior non-load-bearing walls. Currently, brick, aerated concrete blocks, and ceramic blocks are the main materials used for this purpose; however, some of them are relatively heavy, while others lack sufficient strength. It should also be noted that the technology used for erecting these walls relies heavily on manual bricklaying. Manual labor contradicts the overall strategy of mechanizing construction processes, and wages for masons directly increase the cost of one cubic meter of exterior wall in reinforced concrete frame buildings. **Purpose of the article.** To review theoretical principles and practical recommendations for the justified selection of technologies for filling exterior walls in reinforced concrete frame buildings; to outline the scope of research concerning the development of an algorithm for choosing appropriate wall-filling materials based on influencing factors; and to determine the feasibility of applying construction 3D-printing technologies in the process of erecting exterior non-load-bearing walls, including the factors affecting such a choice. **Object of the research.** The technology of erecting exterior non-load-bearing walls in cast-in-place reinforced concrete frame buildings and the determination of conditions for applying construction 3D-printing technologies for wall infill. **Subject of the research.** The processes of exterior wall infill in reinforced concrete frame buildings, along with the associated challenges and methods for addressing current issues of wall construction. **Conclusion.** Based on the conducted analysis, construction 3D-printing technology has been examined and justified as an alternative to manual bricklaying. The study identifies the conditions under which the use of 3D-printing is expedient in the erection of exterior non-load-bearing walls in reinforced concrete frame buildings.

**Keywords:** reinforced concrete frame construction technology; exterior non-load-bearing walls; construction 3D-printing technologies; technologies for filling exterior walls of reinforced concrete frame buildings; technology for erecting exterior non-load-bearing walls in reinforced concrete frame buildings

**Постановка проблеми.** Збільшення частки висотних будівель, що побудовані за технологією монолітно-каркасного будівництва з кожним роком більшає. Основними перевагами будівель монолітно-каркасної конструкції, перед цегляними, збірно-монолітними та панельними багатопверхівками є: висока швидкість будівництва, оптимальні витрати праці на будівництво, вільне планування квартир, оптимальна вартість житла, полегшена конструкція, правильна геометрія і висока міцність залізобетонних конструкцій, відсутність усадки залізобетонних конструкцій. Одним з етапів зведення будівлі за монолітно-каркасною технологією є зведення зовнішніх несучих стін. Наразі основними матеріалами для зведення зовнішніх несучих стін є: цегла, газоблок, керамоблок. Деякі з цих матеріалів відносно важкі, деякі недостатньо міцні. Слід зазначити, що технологія за якою виконують спорудження зовнішніх несучих стін,

вимагає ручної праці мулярів. Ручна праця не відповідає стратегії механізації будівельних робіт, витрати на заробітну плату мулярів, на пряму мають вплив на вартість одиниці об'єму зовнішньої стіни багатопверхівки монолітно-каркасної конструкції.

**Формулювання мети статті.** Метою дослідження є оглянути теоретичні положення та практичні рекомендації щодо обґрунтованого вибору технологій заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних споруд, окреслити межі дослідження розробки алгоритму доцільності вибору матеріалів заповнення відносно окремих факторів вибору, окреслити межі дослідження можливості використання технологій будівельного 3D-друку у процесі заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель та фактори вибору даної технології при заповненні.

**Об'єкт дослідження** – технологія зведення несучих зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель та визначення

межі використання технологій будівельного 3D-друку для виконання заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель.

**Предмет дослідження** – процеси заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних споруд, проблеми та методи вирішення існуючих проблем заповнення зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель.

**Результати досліджень.** Розглядаючи новобудови України, можна зазначити, що у всіх обласних центрах України віддають перевагу монолітно-каркасній технології зведення багатоповерхових будівель. Ринок новобудов, побудованих за монолітно-каркасною технологією, невпинно розвивається, а отже вдосконалення одного з

етапів зведення монолітно-каркасних будівель, такого, як заповнення зовнішніх стін, залишається актуальним.

Ручна праця мулярів забезпечує створення зовнішніх стін, що у час розвитку засобів механізації не є довершеною технологією виконання цих робіт. Основними матеріалами, що використовуються у процесі зведення зовнішніх несучих стін, є цегла, газоблок, керамоблок.

Після проведення огляду новобудов обласних центрів України, що планувались ввести в експлуатацію у 2025 році, було визначено у відсотковому значенні вибір матеріалу зовнішніх несучих стін [1] (табл. 1).

Таблиця 1

**Статистика вибору матеріалів для несучих зовнішніх стін у новобудовах обласних центрів України (за даними огляду 2025 р.)**

Назва матеріалу заповнення зовнішніх стін	Кількість	У відсотковому співвідношенні
Газоблок (газобетон)	116	33 %
Цегла	127	36 %
Керамоблок	102	29 %

Найпоширенішим матеріалом для заповнення зовнішніх несучих стін монолітно-каркасних багатоповерхових будівель є цегла (рис. 1, *a*), на другому місці

газоблок (рис. 1, *б*), на третьому місці керамоблок (рис. 1, *в*) і четверте місце посідають навісні скляні системи [2–4].

*a**б**в*

*Рис. 1. Монолітно-каркасні будівлі з заповненими зовнішніми несучими стінами:*

*a* – зовнішні стіни монолітно-каркасної будівлі із цегли (ЖК «Стрітенський» м. Полтава, Україна);

*б* – зовнішні стіни монолітно-каркасної будівлі із газоблоків (ЖК «West Hall» м. Дніпро, Україна);

*в* – зовнішні стіни монолітно-каркасної будівлі із керамоблока (ЖК «City House» м. Львів, Україна)

Серед альтернативи ручної праці мулярів існують технології 3D-друку, що активно знаходять своє застосування у будівельній галузі. Наразі технології будівельного 3D-друку поширені у будівництві приватних

будинків. Одним з таких прикладів є будівництво приватного будинка із застосуванням будівельного 3D-принтера, виробництва компанії COBOD [5] (рис. 2).



Рис. 2. Зведення приватного будинку із застосуванням будівельного 3D-принтера компанії COBOD

Прикладом одного з перших будівельних об'єктів, що були надруковані в Україні є школа у м. Львів (рис. 3). Будівля школи є добудованою, залишилося влаштування

території коло будівлі. Ввести в експлуатацію школу, що була надрукована за технологією будівельного 3D-друку планують до кінця 2025 року [6].



Рис. 3. Один з перших надрукованих будівельних об'єктів, надрукованих 3D-принтером в Україні – школа (м. Львів, Україна)

Впровадження технологій будівельного 3D-друку при зведенні приватних будинків створює передумови для визначення доцільності впровадження цих технологій у процес спорудження висотних монолітно-каркасних будівель.

Еколого-економічні переваги переходу на 3D-друк будівельних об'єктів у контексті INDUSTRIU 4.0 було детально розглянуто раніше [7]. Автори дійшли висновку, що 3D-друк має значний потенціал для розвитку будівельної галузі України, оскільки дозволяє підвищити екологічність та енергоефективність будівель, скоротити витрати часу та ресурсів на зведення об'єктів, а також забезпечує більш доступне та швидке будівництво. Дослідження показало, що застосування 3D-друку сприяє зниженню собівартості одиниці площі будівельної конструкції та скороченню термінів окупності інноваційного будівельного бізнесу. Крім того, впровадження цих технологій створює передумови для розвитку

висококваліфікованого персоналу та підвищення ефективності будівельного процесу в цілому, що робить 3D-друк перспективним інструментом модернізації української будівельної галузі.

Результати наукових досліджень, що направлені на розробку наукових основ створення вітчизняної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку представлені у монографії «Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3D-друку будівельних об'єктів» [8].

Огляд конструкцій 3D-принтера та огляд технологічних рішень було розглянуто у наукових статтях [9–12].

Основними проблемами використання даної технології у процесі зведення монолітного каркасу монолітно-каркасних багатоповерхових будівель є: недостатня міцність стін, колон, надрукованих будівельним 3D-принтером, відсутня конструкція 3D-принтера здатна друкувати будівельну суміш з арматурний пояс.

Однак ці недоліки не завадять використанню технології 3D-друку у спорудженні зовнішніх несучих стін, міцність яких зможе задовольнити технологія 3D-друку.

У монолітно-каркасних будівлях зовнішні несучі стіни, надруковані будівельним 3D-принтером, складаються з наступного: надруковані нез'ємні опалубки, зовнішня і внутрішня, з легкого бетону, між якими є простір. Даний простір рекомендується заповнювати рідкими утеплюючими матеріалами, після застигання яких буде утворений тепло та звукопоглинаючий прошарок, між двома надрукованими стінами.

Данна технологія покликана замінити ручну працю мулярів, що теоретично збільшить швидкість спорудження зовнішніх стін, зменшить вартість одиниці об'єму зовнішньої стіни, покращить якість та фізико-механічні властивості стіни.

Однак ця технологія потребує високоякісного обладнання – будівельного 3D-принтеру, технічного персоналу для обслуговування даної будівельної машини, розроблення будівельних норм для використання цієї технології у процесі зведення монолітно-каркасних багатоповерхових будівель.

### Висновки

Слід зазначити, що відсутність методу вибору матеріалу заповнення зовнішніх стін є відкритим питанням, а наукове дослідження цього питання покращить та полегшить роботу проектних організацій та

збільшить правильність вибору заповнюючого матеріалу, в залежності від вихідних параметрів та призначення багатоповерхової будівлі.

Вирішення проблеми вдосконалення методу спорудження зовнішніх стін монолітно-каркасних будівель, дозволяє підвищити технологічність виконання будівельних робіт, зменшення відсотка ручної праці при зведенні багатоповерхівок монолітно-каркасної конструкції. До того ж, впровадження технологій будівельного 3D-друку покликано зменшити вартість певного об'єму зовнішньої несучої стіни та збільшення фізико-механічних властивостей.

Однак, запропонована технологія, що передбачає використання будівельного 3D-принтера, потребує висококваліфікованого персоналу для технічного обслуговування будівельної машини та розробки будівельних норм на виконання даних робіт.

Отже, запропонована ідея вимагає вивчення, розробки технічного обладнання, прорахунок вартості певного об'єму надрукованої несучої стіни монолітно-каркасної будівлі будівельним 3D-принтером та порівняння з традиційними методами спорудження зовнішніх несучих стін, за технологією ручної кладки, стандартними матеріалами заповнення (цегла, газоблок, керамоблок). Доцільність дослідження спорудження зовнішніх несучих стін є цілком обґрунтованою, на тлі зростаючого поширення технологій будівельного 3D-друку.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нерухомість України. ЛУН. URL: <https://lun.ua/?srsltid=AfmBOopSJGTN5jcNnWT-ZJUtHg3qawteZYMNEz3c3dHz38vyPxaDJjGm>
2. ЖК «Стрітенський». ЛУН. URL: <https://surl.li/nwedgr>
3. ЖК «West Hall». ЛУН. URL: [https://lun.ua/uk/%D0%B6%D0%BA-west-hall-%D0%B4%D0%BD%D1%96%D0%BF%D1%80%D0%BE?srsltid=AfmBOop8trxdDQDheUG8vUqeDe8K1\\_RMZNx7sxi\\_-lhWjswJZ5NUL2m1](https://lun.ua/uk/%D0%B6%D0%BA-west-hall-%D0%B4%D0%BD%D1%96%D0%BF%D1%80%D0%BE?srsltid=AfmBOop8trxdDQDheUG8vUqeDe8K1_RMZNx7sxi_-lhWjswJZ5NUL2m1)
4. ЖК «City House». ЛУН. URL: [https://lun.ua/uk/%D0%B6%D0%BA-city-house-%D0%BB%D1%8C%D0%B2%D1%96%D0%B2?srsltid=AfmBOorjtyrhXtjRWlv64\\_E5BjJ9G\\_Q-BaZ\\_SAqztLF-h3M-4C1RYrvo](https://lun.ua/uk/%D0%B6%D0%BA-city-house-%D0%BB%D1%8C%D0%B2%D1%96%D0%B2?srsltid=AfmBOorjtyrhXtjRWlv64_E5BjJ9G_Q-BaZ_SAqztLF-h3M-4C1RYrvo)
5. World leader in 3D construction printing solutions. Cobod. URL: <https://cobod.com>
6. Завершують фасадні роботи : що відомо про будівництво 3D-школи у Львові. Суспільне Львів. URL: <https://suspilne.media/lviv/1018365-zaversuut-fasadni-roboti-so-vidomo-pro-budivnictvo-3d-skoli-u-lvovi/>
7. Шатов С. В., Маценко О. М., Скрипка Є. О., Даниленко І. О. Еколого-економічні переваги переходу на 3D-друку будівельних об'єктів у руслі INDUSTRY 4.01. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 1 (001). С. 124–131. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/6476/1/SHATOV.pdf>

8. Савицький М., Айріх Ш., Халаф І. та ін. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3D-друку будівельних об'єктів : колективна монографія за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. Савицького. Дніпро : ФОП Удовиченко О. М., 2019. 233 с. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/4000>
9. Іванов-Костецький С., Гуменник І., Воронкова І. Шляхи застосування технологій 3D-друку у створенні сучасних об'єктів архітектури. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2022/may/27954/9.pdf>
10. Orysenko Olexandr, Nesterenko Mykola, Shokalo Artem, Nesterenko Tetiana. Design of 3D printers analysis for construction and architecture. URL: [https://znp.nupp.edu.ua/files/archive/ua/57\\_2021/15.pdf](https://znp.nupp.edu.ua/files/archive/ua/57_2021/15.pdf)
11. Гавронська І. Г., Ковальський В. П. Перспектива розвитку інноваційних технологій 3D-друку в будівництві та його особливості. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/42247/20663.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
12. Комишев Д. Г., Белятинський А. О. Інноваційні технології в будівництві : 3D-друк будівель, мобільні програми та штучний інтелект. URL: [https://www.researchgate.net/publication/381061921\\_INNOVACIJNI\\_TEHNOLOGII\\_V\\_BUDIVNICTVI\\_3D-DRUK\\_BUDIVEL\\_MOBILNI\\_PROGRAMI\\_TA\\_STUCNIJ\\_INTELEKT](https://www.researchgate.net/publication/381061921_INNOVACIJNI_TEHNOLOGII_V_BUDIVNICTVI_3D-DRUK_BUDIVEL_MOBILNI_PROGRAMI_TA_STUCNIJ_INTELEKT)

## REFERENCES

1. *Nerukhomist' Ukrayiny* [Real estate in Ukraine]. LUN. URL: <https://lun.ua/?srsltid=AfmBOopSJGTN5jcNnWT-ZJUthg3qawteZYMNEzcc3dHz38vyPxaDjGm> (in Ukrainian).
2. ZHK "Stritens'kyi" [Streetenskyi Residential Complex]. LUN. URL: <https://surl.li/nwedgr> (in Ukrainian).
3. ZHK "West Hall" [West Hall Residential Complex]. LUN. URL: [https://lun.ua/uk/%D0%B6%D0%BA-west-hall-%D0%B4%D0%BD%D1%96%D0%BF%D1%80%D0%BE?srsltid=AfmBOop8trxdDQDheUG8vUqeDe8K1\\_RMZNx7sxi\\_-lhWjswJZ5NUL2m1](https://lun.ua/uk/%D0%B6%D0%BA-west-hall-%D0%B4%D0%BD%D1%96%D0%BF%D1%80%D0%BE?srsltid=AfmBOop8trxdDQDheUG8vUqeDe8K1_RMZNx7sxi_-lhWjswJZ5NUL2m1) (in Ukrainian).
4. ZHK "City House" [City House Residential Complex]. LUN. URL: [https://lun.ua/uk/%D0%B6%D0%BA-city-house-%D0%BB%D1%8C%D0%B2%D1%96%D0%B2?srsltid=AfmBOorjtyrhXtjRWlv64\\_E5BjJ9G\\_Q-BaZ\\_SAgztLF-h3M-4C1RYrvo](https://lun.ua/uk/%D0%B6%D0%BA-city-house-%D0%BB%D1%8C%D0%B2%D1%96%D0%B2?srsltid=AfmBOorjtyrhXtjRWlv64_E5BjJ9G_Q-BaZ_SAgztLF-h3M-4C1RYrvo) (in Ukrainian).
5. World leader in 3D construction printing solutions. Cobod. URL: <https://cobod.com>
6. *Zavershuyut' fasadni roboty : shcho vidomo pro budivnytstvo 3D-shkoly u Lvovi* [Facade work is being completed : what is known about the construction of a 3D school in Lviv]. Suspilne Lviv. URL: <https://suspilne.media/lviv/1018365-zaversuut-fasadni-roboti-so-vidomo-pro-budivnictvo-3d-skoli-u-lvovi/> (in Ukrainian).
7. Shatov S.V., Matsenko O.M., Skrypka Yev.O. and Danylenko I.O. *Ekoloho-ekonomichni perevahy perekhodu na 3D-druk budivel'nykh ob'ektiv u rusli INDUSTRY 4.01* [Environmental and economic advantages of switching to 3D-printing construction objects in the INDUSTRY 4.01 FIELD]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no. 1 (001), pp. 124–131. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/6476/1/SHATOV.pdf> (in Ukrainian).
8. Savytskyi M., Ayrych Sh., Khalaf I.Z. and oth. *Arkhitekturno-konstruktivno-tekhnologichna systema 3d-druku budivel'nykh ob'ektiv : kolektyvna monografiya za zah. red. d-ra tekhn. nauk, prof. M. Savyts'koho* [Architectural, structural and technological system for 3D printing of construction objects : collective monograph under the general editorship of Dr. Tech. Sciences, Prof. M. Savytskyi]. Dnipro : FOP Udovichenko O.M., 2019, 233 p. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/4000> (in Ukrainian).
9. Ivanov-Kostetsky S., Gumennyk I. and Voronkova I. *Shlyakhy zastosuvannya tekhnolohiy 3D-druku u stvorenni suchasnykh ob'ektiv arkhitektury* [Ways of application of 3D-printing technologies in the creation of modern architectural objects]. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2022/may/27954/9.pdf> (in Ukrainian).
10. Orysenko Olexandr, Nesterenko Mykola, Shokalo Artem and Nesterenko Tetiana Design of 3D-printers analysis for construction and architecture. URL: [https://znp.nupp.edu.ua/files/archive/ua/57\\_2021/15.pdf](https://znp.nupp.edu.ua/files/archive/ua/57_2021/15.pdf)
11. Gavronska I.G. and Kovalskyi V.P. *Perspektyva rozvytku innovatsiy nykh tekhnolohiy 3D-druku v budivnytstvi ta yoho osoblyvosti* [Prospects for the development of innovative 3D-printing technologies in construction and its features]. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/42247/20663.pdf?sequence=3&isAllowed=y> (in Ukrainian).
12. Komyshev D.G. and Belyatynsky A.O. *Innovatsiy ni tekhnolohiy i v budivnytstvi : 3D-druk budivel', mobil'ni prohramy ta shtuchnyy intelekt* [Innovative technologies in construction : 3D-printing of buildings, mobile applications and artificial intelligence]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/381061921\\_innovacijni\\_tehnologii\\_v\\_budivnictvi\\_3d-druk\\_budivel\\_mobilni\\_programi\\_ta\\_stucnij\\_intelekt](https://www.researchgate.net/publication/381061921_innovacijni_tehnologii_v_budivnictvi_3d-druk_budivel_mobilni_programi_ta_stucnij_intelekt) (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 26.02.2026.

Прийнято після рецензування: 15.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 628.165

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.122.1249

## ХІМІЧНИЙ СКЛАД ТА МОЛЕКУЛЯРНІ МЕХАНІЗМИ ДІЇ АНТИСКАЛАНТІВ ДЛЯ СИСТЕМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ : ФУНДАМЕНТАЛЬНІ АСПЕКТИ

НЕЧИТАЙЛО М. П.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
НАГОРНА О. К.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
НЕСТЕРОВА О. В.<sup>3\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
НЕЧИТАЙЛО М. М.<sup>4</sup>, студ.,  
ЧЕРНОВА Є. О.<sup>5</sup>, студ.

<sup>1</sup> Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [n\\_np@ukr.net](mailto:n_np@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-5963-0590>

<sup>2</sup> Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [nahorna.olena@pdaba.edu.ua](mailto:nahorna.olena@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-4027-9336>

<sup>3\*</sup> Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [melenanesterenko@gmail.com](mailto:melenanesterenko@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-1035-6572>

<sup>4</sup> Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [n.m.n.margo@gmail.com](mailto:n.m.n.margo@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0008-4040-6888>

<sup>5</sup> Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [sale1@fabrikaosnova.com.ua](mailto:sale1@fabrikaosnova.com.ua), <https://orcid.org/0009-0003-1833-9555>

**Анотація. Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток технологій зворотного осмосу у системах водопідготовки та опріснення води підвищує актуальність ефективних методів запобігання накипоутворенню. Мінеральні відкладення, що формуються на поверхні напівпроникних мембран, призводять до зниження продуктивності систем на 10–15 % протягом перших шести місяців експлуатації, збільшення гідравлічного опору, погіршення якості пермеату, а також до зростання енергоспоживання на 15–30 % та експлуатаційних витрат. Традиційна парадигма прямої адсорбції антискалантів на поверхні кристалів сьогодні переглядається у зв'язку з відкриттям ключової ролі наночастинок як центрів гетерогенної нуклеації, що пояснює надзвичайно низькі робочі концентрації інгібіторів (0,5–20 мг/л). **Мета дослідження.** Метою даної роботи є встановлення взаємозв'язку між хімічною будовою антискалантів і механізмами їх інгібуючої дії у системах зворотного осмосу. Особливу увагу приділено взаємодії функціональних груп фосфонатних і полімерних антискалантів із зародками кристалів та наночастинок, які виконують роль центрів гетерогенної нуклеації. Отримані результати мають створити теоретичну основу для раціонального дизайну антискалантів наступного покоління. **Результати.** У роботі проаналізовано структурні та фізико-хімічні властивості фосфонатних антискалантів, зокрема РВТС, АТМР та НЕДР, а також полімерних антискалантів на основі поліакрилової кислоти (РАА), для якої виявлено три режими інгібуючої дії залежно від молекулярної маси (пороговий механізм при 2000–3000 Да та інші режими для більших мас). Встановлено, що ефективність фосфонатних інгібіторів визначається оптимальним поєднанням хелатуючих властивостей, адсорбційної здатності та молекулярної стабільності; критичною є відстань між функціональними групами 2,5–4,0 Å, що відповідає геометрії кристалічної решітки кальциту. Показано, що ключовим механізмом дії антискалантів є не пряма адсорбція на поверхні кристалів, а селективне блокування наночастинок розміром 10–100 нм, які слугують центрами гетерогенної нуклеації; для ефективного інгібування достатньо заблокувати лише 5–10 % таких наночастинок. Розглянуто математичні моделі, що описують термодинамічні та кінетичні аспекти інгібування кристалізації (модифіковане рівняння Гіббса – Томсона та рівняння Кабрери – Вермілі). Отримані результати створюють теоретичну основу для розроблення антискалантів нового покоління та оптимізації їх застосування у системах зворотного осмосу.

**Ключові слова:** зворотний осмос; антискаланти; фосфонати; механізми інгібування; нуклеація; кристалізація; наночастинок; гетерогенна нуклеація

## CHEMICAL COMPOSITION AND MOLECULAR MECHANISMS OF ACTION OF ANTISCALANTS FOR REVERSE OSMOSIS SYSTEMS : FUNDAMENTAL ASPECTS

NECHYTAILO M.P.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
NAHORNA O.K.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
NESTEROVA O.V.<sup>3\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
NECHYTAILO M.M.<sup>4</sup>, *Stud.*,  
CHERNOVA Yev.O.<sup>5</sup>, *Stud.*

<sup>1</sup> Department of Water Supply, Wastewater Engineering and Hydraulics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [n\\_np@ukr.net](mailto:n_np@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-5963-0590>

<sup>2</sup> Department of Water Supply, Wastewater Engineering and Hydraulics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [nahorna.olena@pdaba.edu.ua](mailto:nahorna.olena@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-4027-9336>

<sup>3\*</sup> Department of Water Supply, Wastewater Engineering and Hydraulics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [melenanesterenko@gmail.com](mailto:melenanesterenko@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-1035-6572>

<sup>4</sup> Department of Water Supply, Wastewater Engineering and Hydraulics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [n.m.n.margo@gmail.com](mailto:n.m.n.margo@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0008-4040-6888>

<sup>5</sup> Department of Water Supply, Wastewater Engineering and Hydraulics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [sale1@fabrikaosnova.com.ua](mailto:sale1@fabrikaosnova.com.ua), <https://orcid.org/0009-0003-1833-9555>

**Abstract. Problem Statement.** The rapid development of reverse osmosis technologies in water treatment and desalination systems increases the relevance of effective methods for preventing scale formation. Mineral deposits formed on the surface of semi-permeable membranes lead to a 10–15 % reduction in system productivity within the first six months of operation, increased hydraulic resistance, deterioration of permeate quality, as well as a 15–30 % increase in energy consumption and operating costs. The traditional paradigm of direct antiscalant adsorption on crystal surfaces is currently being revised in connection with the discovery of the key role of nanoparticles as centers of heterogeneous nucleation, which explains the extremely low operating concentrations of inhibitors (0.5–20 mg/L). **Purpose of the study.** The purpose of this work is to establish the relationship between the chemical structure of antiscalants and the mechanisms of their inhibitory action in reverse osmosis systems. Special attention is paid to the interaction of functional groups of phosphonate and polymeric antiscalants with crystal nuclei and nanoparticles, which serve as centers of heterogeneous nucleation. The obtained results are intended to create a theoretical basis for the rational design of next-generation antiscalants. **Results.** The structural and physicochemical properties of phosphonate antiscalants, in particular PBTC, ATMP, and HEDP, as well as polymeric antiscalants based on polyacrylic acid (PAA), have been analyzed; for PAA, three modes of inhibitory action depending on molecular weight have been identified (threshold mechanism at 2000–3000 Da and other modes for higher masses). It has been established that the effectiveness of phosphonate inhibitors is determined by the optimal combination of chelating properties, adsorption capacity, and molecular stability; the critical distance between functional groups is 2.5–4.0 Å, which corresponds to the geometry of the calcite crystal lattice. It has been shown that the key mechanism of antiscalant action is not direct adsorption on crystal surfaces, but selective blocking of nanoparticles with a size of 10–100 nm, which serve as centers of heterogeneous nucleation; for effective inhibition, it is sufficient to block only 5–10 % of such nanoparticles. Mathematical models describing the thermodynamic and kinetic aspects of crystallization inhibition (modified Gibbs –Thomson equation and Cabrera – Vermilyea equation) have been considered. The obtained results create a theoretical basis for the development of new-generation antiscalants and optimization of their application in reverse osmosis systems.

**Keywords:** *reverse osmosis; antiscalants; phosphonates; inhibition mechanisms; nucleation; crystallization; nanoparticles; heterogeneous nucleation*

**Постановка проблеми.** Глобальне зростання потужностей систем зворотного осмосу, яке досягло 97,2 млн м<sup>3</sup>/добу у 2020 році з прогнозованим зростанням до 140 млн м<sup>3</sup>/добу до 2030 року, ставить нові

виклики перед технологіями водопідготовки [1]. Центральною проблемою залишається утворення мінеральних відкладень на поверхні напівпроникних мембран, що призводить до зниження продуктивності

систем на 10-15 % протягом перших шести місяців експлуатації та збільшення енергоспоживання на 15-30 % [2].

Протягом десятиліть вважалося, що антискаланти працюють через пряму адсорбцію на поверхні кристалів, які формуються. Однак ця парадигма не могла адекватно пояснити надзвичайно низькі робочі концентрації інгібіторів, які часто становлять лише 0,5-20 мг/л. Революційне дослідження групи Попова, опубліковане у 2024 році в журналі *Crystals*, кардинально змінило наше розуміння процесу [3]. Використовуючи флуоресцентно-мічені молекули антискалантів, дослідники виявили, що основний механізм дії полягає не в прямій взаємодії з кристалами, а в блокуванні наночастинок розміром 10-100 нм, які слугують центрами гетерогенної нуклеації.

Це відкриття має фундаментальне значення для розвитку галузі з кількох причин. По-перше, воно нарешті пояснює довготривалу загадку надзвичайної ефективності антискалантів при мінімальних концентраціях – блокування лише кількох відсотків наночастинок ( $\sim 10^6$  частинок/мл навіть у деіонізованій воді) достатньо для запобігання накипоутворенню. По-друге, відкриває шлях до створення принципово нових класів інгібіторів, спеціально розроблених для взаємодії з наночастинами, а не з поверхнею кристалів. По-третє, дозволяє переосмислити стратегії дозування та оптимізації процесів водопідготовки, зосередивши увагу на контролі наночастинок у вихідній воді.

**Мета дослідження** - встановлення чіткого взаємозв'язку між хімічною будовою антискалантів та механізмом їх інгібувальної дії в системах зворотного осмосу. Основну увагу зосереджено на аналізі того, як саме функціональні групи реагентів взаємодіють із зародками кристалів на молекулярному рівні. Отримані результати дозволять науково обґрунтувати підбір інгібіторів для подовження терміну служби мембран та оптимізації витрат на експлуатацію.

**Виклад основного матеріалу. Хімічна структура антискалантів як основа їх**

**функціональності.** Взаємозв'язок між молекулярною архітектурою та функціональними властивостями антискалантів являє собою складну систему, де кожен структурний елемент вносить специфічний внесок у загальну ефективність. Розуміння цих взаємозв'язків критично важливе для раціонального дизайну нових молекул з покращеними характеристиками.

#### **Фосфонатні антискаланти.**

Фосфонатні сполуки, які займають понад 45 % світового ринку антискалантів, завдячують своїм успіхом унікальній комбінації хімічної стабільності та хелатуючої здатності. На відміну від поліфосфатів, які швидко гідролізуються у водних розчинах (період напіврозпаду менше 24 годин), фосфонати містять міцний C-P зв'язок з енергією дисоціації 272 кДж/моль, що забезпечує їх стабільність навіть при підвищених температурах [4].

Розглянемо 2-фосфобутан-1,2,4-трикарбонову кислоту (РВТС) як модельну сполуку для розуміння структурно-функціональних залежностей. Молекула РВТС містить одну фосфонову та три карбоксильні групи, розташовані таким чином, що створюють оптимальну геометрію для утворення хелатних комплексів з іонами лужноземельних металів. Дослідження методом рентгеноструктурного аналізу показали, що відстань між функціональними групами становить 2,8-3,2 Å, що відповідає відстані між іонами кальцію в кристалічній решітці кальциту [5].

Термічна стабільність РВТС зберігається до 212°C згідно з даними термогравіметричного аналізу, що робить цю сполуку придатною для використання в системах з підвищеною температурою. Константа стабільності комплексу РВТС з  $\text{Ca}^{2+}$  за температури 25°C та іонної сили 0,1 М становить:

$$\log K = 5,85 \pm 0,12, \quad (1)$$

де  $K$  – константа стабільності комплексу  $[ML]/([M][L])$ .

Амінотриметиленфосфорова кислота (АТМР) демонструє дещо інший механізм дії завдяки наявності центрального атома азоту.

Квантово-хімічні розрахунки методом DFT на рівні B3LYP/6-311++G (d, p) показали, що електронна густина на атомі азоту створює додатковий центр координації, що дозволяє АТМР утворювати більш стабільні комплекси порівняно з HEDP [6]. Енергія зв'язування АТМР з поверхнею кальциту становить:

$$E_{ads} = -156,3 \text{ кДж/моль}, \quad (2)$$

що на 10 % вище, ніж для HEDP (-142,7 кДж/моль).

### **Полімерні антискаланти.**

Представляють принципово інший підхід до інгібування накипоутворення. Поліакрилова кислота (РАА), попри простоту своєї хімічної структури, демонструє складну залежність ефективності від молекулярної маси. Нещодавні дослідження з використанням гель-проникної хроматографії з мультикутовим детектором розсіювання світла виявили три різні режими дії залежно від розміру макромолекул [7].

При молекулярній масі 2000–3000 Да домінує пороговий механізм інгібування. Невеликі молекули здатні швидко дифундувати до поверхні зародків кристалізації зі швидкістю, що описується рівнянням Стокса-Ейнштейна:

$$D = \frac{kB \cdot T}{6\pi \cdot \eta \cdot Rh}, \quad (3)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;  $kB$  – стала Больцмана, Дж/К,  $kB = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – температура, К;  $\eta$  – в'язкість середовища, Па·с;  $Rh$  – гідродинамічний радіус молекули, м.

Для РАА з молекулярною масою 2500 Да,  $Rh = 1,8$  нм, що дає коефіцієнт дифузії  $1,2 \times 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с при 25°C. Це забезпечує швидке досягнення поверхні критичних зародків розміром 2-5 нм за час менше 1 мс.

**Революційний механізм блокування наночастинок.** Відкриття механізму блокування наночастинок-центрів нуклеації представляє парадигматичний зсув у розумінні дії антискалантів. Традиційна теорія передбачала, що інгібітори адсорбуються безпосередньо на поверхні

кристалів, сповільнюючи їх ріст. Однак експерименти з флуоресцентно-міченими антискалантами показали зовсім іншу картину [3].

Дослідження виявило, що навіть у надчистій деіонізованій воді присутні більше мільйона наночастинок на мілілітр, переважно оксиди та гідроксиди заліза розміром 10–100 нм. Ці частинки служать центрами гетерогенної нуклеації, знижуючи енергетичний бар'єр утворення критичного зародка. Класична теорія нуклеації описує цей процес рівнянням:

$$\Delta G_{zet} = \Delta G_{zom} \cdot f(\theta), \quad (4)$$

де  $\Delta G_{zet}$  та  $\Delta G_{zom}$  – енергії активації для гетерогенної та гомогенної нуклеації відповідно, кДж/моль;  $f(\theta)$  – функція змочування ( $0 < f(\theta) < 1$ ).

Для типових наночастинок оксиду заліза  $f(\theta) \approx 0,1 - 0,3$ , що означає зниження енергетичного бар'єра на 70–90 %. Антискаланти селективно адсорбуються на цих наночастинках, блокуючи їх функцію як центрів нуклеації. Критично важливо, що для ефективного інгібування достатньо заблокувати лише 5–10 % наночастинок, оскільки це підвищує енергетичний бар'єр нуклеації до рівня, при якому спонтанне утворення кристалів стає термодинамічно не вигідним.

**Математичне моделювання процесів інгібування.** Математичне моделювання дозволяє прогнозувати ефективність антискалантів та оптимізувати їх дозування. Сучасні моделі враховують як термодинамічні, так і кінетичні аспекти процесу кристалізації.

**Термодинамічний підхід.** Термодинамічний потенціал утворення критичного зародка описується модифікованим рівнянням Гіббса-Томсона:

$$\Delta G^* = \frac{16\pi \cdot \sigma^3 V_m^2}{3 \cdot (R \cdot T \cdot \ln S)^2}, \quad (5)$$

де  $\sigma$  – поверхневий натяг на межі кристал-розчин, Дж/м<sup>2</sup> (для  $CaCO_3$   $\sigma =$

$= 0,040 \text{ Дж/м}^2$ ;  $V_m$  – молярний об'єм кристалічної фази,  $\text{см}^3/\text{моль}$  ( $36,9 \text{ см}^3/\text{моль}$  для кальциту);  $R$  – універсальна газова стала,  $\text{Дж/моль}\cdot\text{К}$ ,  $R = 8,314 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$ ;  $T$  – абсолютна температура,  $\text{К}$ ;  $S$  – ступінь пересичення.

Присутність антискалантів модифікує цей вираз через зміну ефективного поверхневого натягу:

$$\sigma_{ef} = \sigma_0 \cdot \left( 1 + \frac{K_{ads} \cdot [I]}{K_m} \right), \quad (6)$$

де  $\sigma_0$  – поверхневий натяг без інгібітору,  $\text{Дж/м}^2$ ;  $K_{ads}$  – константа адсорбції антискаланту,  $\text{л/моль}$ ;  $[I]$  – концентрація інгібітору,  $\text{моль/л}$ ;  $K_m$  – константа Міхаеліса,  $\text{моль/л}$ .

**Кінетична модель.** Швидкість росту кристалів у присутності антискаланту описується модифікованим рівнянням Кабрери-Вермілі, яке враховує блокування активних центрів росту (7):

$$v = v_0 \cdot \left[ (S-1) - \frac{2\sigma \cdot \Omega}{k \cdot T \cdot \rho} \right] \cdot \left[ 1 - \exp\left( \frac{-K_a \cdot [I]}{[I]_0} \right) \right],$$

де  $v_0$  – швидкість росту без інгібітору,  $\text{м/с}$ ;  $\Omega$  – об'єм молекули в кристалі,  $\text{м}^3$ , ( $\Omega = 6,13 \times 10^{-29} \text{ м}^3$  для  $\text{CaCO}_3$ );  $k$  – стала Больцмана;  $\rho$  – відстань між адсорбованими молекулами інгібітору,  $\text{м}$ ;  $K_a$  – константа

адсорбції антискаланту, що характеризує спорідненість інгібітору до поверхні кристала,  $\text{л/моль}$ ;  $[I]_0$  – порогова концентрація,  $\text{мг/л}$ .

Експериментальні дані показують, що для HEDP при  $25^\circ\text{C}$  та  $\text{pH}=8,0$ ,  $K_a = 2,3 \times 10^4 \text{ л/моль}$ ,  $[I]_0 = 0,5 \text{ мг/л}$  [8].

## Висновки

Проведений аналіз хімічної структури та механізмів дії антискалантів дозволяє сформулювати наступні висновки:

1. Ефективність фосфонатних антискалантів визначається оптимальним поєднанням хелатуючих властивостей та здатності до адсорбції на наночастинках, при цьому критичною є відстань між функціональними групами  $2,5\text{-}4,0 \text{ \AA}$ .

2. Революційне відкриття механізму блокування наночастинок – центрів нуклеації – фундаментально змінює підходи до розробки нових антискалантів та стратегій їх застосування.

3. Математичні моделі, що враховують гетерогенну нуклеацію, дозволяють точніше прогнозувати ефективність інгібування та оптимізувати дозування.

Отримані результати створюють теоретичну основу для раціонального дизайну антискалантів наступного покоління з покращеними характеристиками та розробки оптимальних режимів їх застосування в системах зворотного осмосу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Karabelas A. J., Mitrouli S. T., Kostoglou M. Scaling in reverse osmosis desalination plants : A perspective focusing on development of comprehensive simulation tools. *Desalination*. 2024. Vol. 474. Article 114193. DOI: 10.1016/j.desal.2019.114193.
2. Antony A., Low J. H., Gray S. et al. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems : a review. *Journal of Membrane Science*. 2011. Vol. 383, № 1-2. Pp. 1-16. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.08.054.
3. Popov K., Vainer Y., Silaev G. et al. Potential nano/microcenters of crystal nucleation in reagent-grade purity solvents and their differentiation by fluorescent-tagged antiscalant. *Crystals*. 2024. Vol. 14, № 7. Article 650. DOI: 10.3390/cryst14070650.
4. Kaushik V., Kumar N., Ghumra D. et al. Investigation of scaling inhibition and biofouling potential of different molecular weight fractions of a PAA antiscalant. *npj Clean Water*. 2024. Vol. 7. Article 36. DOI: 10.1038/s41545-024-00332-7.
5. Yao Y., Ge X., Yin Y. et al. Antiscalants for mitigating silica scaling in membrane desalination : Effects of molecular structure and membrane process. *Water Research*. 2023. Vol. 246. Article 120701. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120701.
6. Liu X., Zhang J., Chen Y. et al. Simultaneous adsorption of organic phosphonate and orthophosphate from municipal sewage on nanoparticle  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  with molecular simulation. *npj Clean Water*. 2025. Vol. 8. Article 40. DOI: 10.1038/s41545-025-00453-7.

7. Tkachenko S. V., Trukhina M., Ryabova A. et al. Fluorescent-tagged antiscalants. The new materials for scale inhibition mechanism studies, antiscalant traceability and antiscaling efficacy optimization during  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  scale formation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, № 4. Article 3087. DOI: 10.3390/ijms24043087.

8. Mutke X. A. M., Tavichaiyuth K., Drees F. et al. Oxidation of the nitrogen-free phosphonate antiscalants HEDP and PBTC in reverse osmosis concentrates : Reaction kinetics and degradation rate. *Water Research*. 2023. Vol. 233. Article 119802. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119571.

## REFERENCES

1. Karabelas A.J., Mitrouli S.T. and Kostoglou M. Scaling in reverse osmosis desalination plants : A perspective focusing on development of comprehensive simulation tools. *Desalination*. 2024, vol. 474, article 114193. DOI: 10.1016/j.desal.2019.114193.

2. Antony A., Low J.H., Gray S. et al. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems : a review. *Journal of Membrane Science*. 2011, vol. 383, no. 1-2, pp. 1-16. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.08.054.

3. Popov K., Vainer Y., Silaev G. et al. Potential nano/microcenters of crystal nucleation in reagent-grade purity solvents and their differentiation by fluorescent-tagged antiscalant. *Crystals*. 2024, vol. 14, no. 7, article 650. DOI: 10.3390/cryst14070650.

4. Kaushik V., Kumar N., Ghumra D. et al. Investigation of scaling inhibition and biofouling potential of different molecular weight fractions of a PAA antiscalant. *npj Clean Water*. 2024, vol. 7, article 36. DOI: 10.1038/s41545-024-00332-7.

5. Yao Y., Ge X., Yin Y. et al. Antiscalants for mitigating silica scaling in membrane desalination: Effects of molecular structure and membrane process. *Water Research*. 2023, vol. 246, article 120701. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120701.

6. Liu X., Zhang J., Chen Y. et al. Simultaneous adsorption of organic phosphonate and orthophosphate from municipal sewage on nanoparticle  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  with molecular simulation. *npj Clean Water*. 2025, vol. 8, article 40. DOI: 10.1038/s41545-025-00453-7.

7. Tkachenko S.V., Trukhina M., Ryabova A. et al. Fluorescent-tagged antiscalants. The new materials for scale inhibition mechanism studies, antiscalant traceability and antiscaling efficacy optimization during  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  scale formation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023, vol. 24, no. 4, article 3087. DOI: 10.3390/ijms24043087.

8. Mutke X.A.M., Tavichaiyuth K., Drees F. et al. Oxidation of the nitrogen-free phosphonate antiscalants HEDP and PBTC in reverse osmosis concentrates : Reaction kinetics and degradation rate. *Water Research*. 2023, vol. 233, article 119802. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119571.

Надійшла до редакції: 27.02.2026.

Прийнято після рецензування: 10.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 620.17:624.011.1

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.128.1250

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ НА ЗГИН ДЕРЕВОЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПАНЕЛІ ПЕРЕКРИТТЯ

НИКІФОРОВА Т. Д.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ФЕДІН В. А.<sup>2\*</sup>, *асп.*

<sup>1</sup> Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: [t.d.nikiforova@ust.edu.ua](mailto:t.d.nikiforova@ust.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-0688-2759>

<sup>2\*</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 882-28-08, e-mail: [fedin.vladyslav@pdaba.edu.ua](mailto:fedin.vladyslav@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8829-7520>

**Анотація. Постановка проблеми.** Сучасний розвиток будівельної галузі характеризується активним пошуком конструктивних рішень, що поєднують високі експлуатаційні показники з підвищеною екологічною ефективністю. Одним із перспективних напрямів є використання перехресно-клеєної деревини (ПКД) у складі композитних систем перекриття. Такі конструкції забезпечують зменшення маси будівель, зниження вуглецевого сліду та ефективне використання відновлюваних ресурсів. Водночас для підвищення жорсткості та несучої здатності дерев'яні елементи доцільно поєднувати з бетонним шаром, формуючи деревобетонні композитні конструкції. Додатковим напрямом підвищення екологічності таких систем є застосування рециклінгових матеріалів у складі бетону, зокрема крупних заповнювачів, отриманих шляхом переробки будівельних відходів. Попри потенціал цього підходу, експериментальні дані щодо роботи композитних конструкцій з перехресно-клеєної деревини та бетону на рециклінговому заповнювачі залишаються обмеженими, що обумовлює необхідність проведення відповідних досліджень. **Мета статті.** Метою роботи є експериментальне дослідження несучої здатності деревозалізобетонної композитної панелі перекриття на основі плити з перехресно-клеєної деревини та бетонного шару з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження при роботі на згин. **Методика.** Для досягнення поставленої мети було розроблено дослідний зразок композитної панелі перекриття, що складається з плити з перехресно-клеєної деревини товщиною 90 мм та монолітного бетонного шару товщиною 50 мм на рециклінговому крупному заповнювачі. Спільна робота шарів забезпечувалася системою Г-подібних анкерних елементів, встановлених у масив деревини. Перед виготовленням композитної конструкції проведено експериментальне визначення фізико-механічних характеристик рециклінгового бетону шляхом випробування стандартних кубів і призм на стиск та визначення модуля пружності. Після набору міцності бетонного шару виконано випробування композитної панелі на згин за стандартною методикою. У процесі випробувань фіксувалися значення навантаження, прогинів та характер руйнування конструкції. **Висновки.** За результатами експериментальних досліджень встановлено, що рециклінговий бетон, використаний у складі композитної панелі, відповідає класу міцності C32/40. Руйнівне навантаження дослідженої деревозалізобетонної панелі перекриття становило 52 кН, що перевищує відповідний показник аналогічної плити з перехресно-клеєної деревини без бетонного шару приблизно на 15 %. Отримані результати підтверджують ефективність використання композитної системи на основі перехресно-клеєної деревини та бетону з рециклінговим заповнювачем для підвищення несучої здатності перекриття. Проведені дослідження створюють передумови для подальшого чисельного моделювання напружено-деформованого стану таких конструкцій і розширення практики використання екологічно орієнтованих композитних систем у сучасному будівництві.

**Ключові слова:** *перехресно-клеєна деревина; дерево-бетонні композитні конструкції; рециклінговий бетон; композитні перекриття; експериментальні дослідження; несуча здатність*

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BENDING STRENGTH OF A TIMBER CONCRETE COMPOSITE FLOOR PANEL

NIKIFOROVA T.D.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
FEDIN V.A.<sup>2\*</sup>, *Postgrad. Stud.*

<sup>1</sup> Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine,

tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: [t.d.nikiforova@ust.edu.ua](mailto:t.d.nikiforova@ust.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-0688-2759>

<sup>2\*</sup> Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 882-28-08, e-mail: [fedin.vladyslav@pdaba.edu.ua](mailto:fedin.vladyslav@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8829-7520>

**Abstract. Problem statement.** The modern development of the construction industry is characterized by an active search for structural solutions that combine high performance with improved environmental efficiency. One of the promising directions is the use of cross-laminated timber (CLT) in composite floor systems. Such structures ensure a reduction in the weight of buildings, a decrease in the carbon footprint, and efficient use of renewable resources. At the same time, in order to increase stiffness and load-bearing capacity, timber elements are advisable to combine with a concrete layer, forming timber–concrete composite structures. An additional approach to improving the environmental performance of such systems is the use of recycled materials in concrete mixtures, particularly coarse aggregates obtained from the processing of construction waste. Despite the potential of this approach, experimental data on the performance of composite structures made of cross-laminated timber and concrete with recycled aggregates remain limited, which necessitates further research. **Purpose of the article.** The aim of this study is the experimental investigation of the load-bearing capacity of a timber–reinforced concrete composite floor panel based on a cross-laminated timber slab and a concrete layer with recycled coarse aggregate under bending. **Methodology.** To achieve the stated objective, an experimental specimen of a composite floor panel was developed, consisting of a 90 mm thick cross-laminated timber slab and a 50 mm thick monolithic concrete layer made with recycled coarse aggregate. Composite action between the layers was ensured by a system of L-shaped anchor elements installed in the timber body. Prior to manufacturing the composite structure, the physical and mechanical properties of the recycled concrete were experimentally determined by testing standard cubes and prisms in compression and by evaluating the modulus of elasticity. After the concrete layer had reached the required strength, the composite panel was tested in bending according to a standard testing procedure. During the tests, the applied loads, deflections, and the failure pattern of the structure were recorded. **Conclusions.** The results of the experimental study showed that the recycled concrete used in the composite panel corresponds to strength class C32/40. The ultimate load of the investigated timber–reinforced concrete floor panel reached 52 kN, which exceeds the corresponding value of a similar cross-laminated timber slab without a concrete layer by approximately 15 %. The obtained results confirm the effectiveness of using a composite system based on cross-laminated timber and concrete with recycled aggregate to increase the load-bearing capacity of floor structures. The conducted research creates a basis for further numerical modeling of the stress–strain state of such structures and for expanding the practical application of environmentally oriented composite systems in modern construction.

**Keywords:** *cross-laminated timber; timber–concrete composite structures; recycled concrete; composite floor systems; experimental studies; load-bearing capacity*

**Постановка проблеми, мета і задачі дослідження.** Сучасні вектори розвитку будівельної галузі демонструють стійку тенденцію до впровадження екологічно безпечних систем, базовим компонентом яких переважно виступає деревина або композитні матеріали на її основі. Виразним прикладом конструктивних рішень, що задовольняють жорсткі критерії екологічності, є застосування перехресно-клеєної деревини (ПКД). Зазначений матеріал широко застосовується у будівництві різного функціонального призначення, зокрема і в багатоповерхових будівлях [1; 2]. ПКД є інженерним деревинним матеріалом, що складається з непарної кількості шарів дощок, склеєних між собою з взаємно перпендикулярною орієнтацією волокон, зазвичай від трьох до дев'яти шарів. Така структура забезпечує підвищену просторову жорсткість і

стабільність елементів. Крім того, властивості ПКД можуть бути оптимізовані шляхом комбінування деревини різних порід або класів міцності у складі окремих шарів [3]. Поряд із цим, значної актуальності набуває проектування деревобетонних композитних конструкцій. Ефективність таких систем зумовлена синергетичною взаємодією матеріалів: дерев'яний компонент сприяє зниженню маси та мінімізації сумарного вуглецевого сліду [4], тоді як бетонна частина забезпечує суттєве підвищення несучої здатності та жорсткості системи.

При розгляді композитних конструкцій на основі перехресно-клеєної деревини (ПКД) у поєднанні з бетонним шаром актуалізується проблема використання матеріалів, що не повністю відповідають сучасним вимогам екологічної сталості. Зокрема, традиційні бетонні суміші

характеризуються значними енерговитратами [5] під час виробництва та суттєвими викидами вуглекислого газу, що негативно впливає на загальний екологічний баланс будівельної конструкції. У зв'язку з цим одним із перспективних напрямів підвищення екологічності деревобетонних композитів є застосування вторинних або рециклінгових матеріалів у складі бетонної суміші, де використання переробленого крупного заповнювача, отриманого з відходів будівельної індустрії, може сприяти зменшенню споживання природних ресурсів та скороченню обсягів будівельних відходів.

Попри значний потенціал такого підходу, дослідження, присвячені вивченню механічної поведінки бетонів із рециклінговими заповнювачами у складі композитних систем із деревиною, наразі залишаються обмеженими. У більшості випадків вони мають локальний характер і проводяться в межах окремих наукових груп або експериментальних проєктів [6; 7]. Через це відсутня достатня кількість узагальнених експериментальних даних, які б дозволили повною мірою оцінити вплив вторинних заповнювачів на міцнісні, деформаційні та довговічнісні характеристики композитних дерево-бетонних елементів. Особливої уваги потребує аналіз взаємодії між шаром бетону з рециклінговим заповнювачем та елементами з ПКД у зоні контактного з'єднання, оскільки саме ця область визначає ефективність передачі зусиль між матеріалами та рівень спільної роботи компонентів композитної системи.

Враховуючи вище наведене було розроблено і випробувано конструкцію на основі ПКД панелі з бетонним шаром.

Метою даного дослідження є експериментальне дослідження несної здатності деревозалізобетонної панелі перекриття при роботі на згин.

**Матеріали та методи досліджень.** Для проведення досліджень було прийнято деревозалізобетонну панель перекриття, що складається з двох шарів: 1 (нижній) – плита з перехресно-клеєної деревини; 2 (верхній) – плита з бетону на крупному заповнювачі рециклінгового походження.

Плита з перехресно-клеєної деревини (ПКД) виробництва компанії CLT-Result, виготовлена з пиломатеріалів сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.). За конфігурацією плита складається з трьох шарів, кожен з яких має товщину 30 мм. Таким чином, загальна товщина елемента становить 90 мм. Відповідно до даних виробника, застосована деревина характеризується класом міцності не нижче T10 та C16 згідно з вимогами стандартів ДСТУ EN 14080:2013 та ДСТУ EN 338:2022 [8; 9]. Для склеювання шарів використано поліуретановий клей типу I-PUR.

Плита з бетону на крупному заповнювачі рециклінгового походження (РЗБ) виконана монолітною по верхній площині ПКД і має товщину 50 мм. Для проєктування складу важкого бетону з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження застосовувався розрахунково-експериментальний метод, який покладений в основу національних стандартів ДСТУ Б В.2.7-215:2009 та ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. З урахуванням особливостей рециклінгового крупного заповнювача [10] було застосовано удосконалений традиційний розрахунково-експериментальний метод шляхом застосування додаткових поправок на походження рециклінгового крупного заповнювача до коефіцієнтів якості заповнювачів та водопотреби бетонної суміші [11]. По всій площі плити було встановлено арматурну сітку з дроту Ø1 мм, розташовану на відстані 15 мм від поверхні ПКД плити.

Спільна робота плит з РЗБ та ПКД за допомогою Г-подібних анкерів діаметром Ø5 мм, які покривались клеєм *Rolax paint factory D3 Premium* та закручувались в масив деревини у попередньо висвердлені отвори глибиною 30 мм. Загальна довжина анкера становила 60 мм, довжина гака – 20 мм. Анкерне поле формувалося з кроком 250 мм у поздовжньому напрямку з відступом по 125 мм від поперечних граней, а також з кроком 230 мм у поперечному напрямку з відступом 70 мм від поздовжніх граней.

Ширина дослідного зразка деревозалізобетонної панелі перекриття становила 600 мм, довжина – 2000 мм, товщина – 140 мм. Загальна схема деревозалізобетонної панелі перекриття для експериментальних досліджень наведена на рисунку 1.

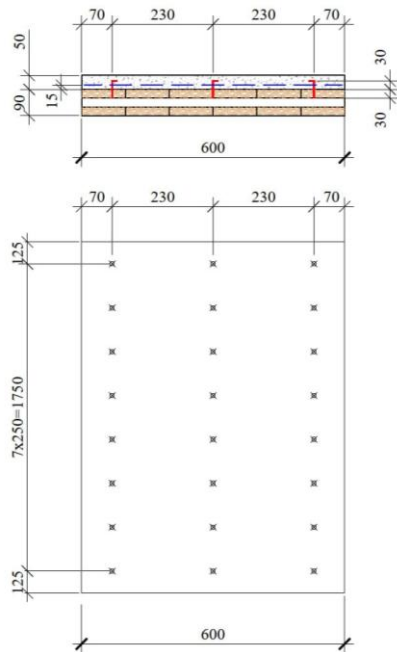


Рис. 1. Загальна схема деревозалізобетонної панелі перекриття для експериментальних досліджень

Перед виготовленням композитної конструкції ПКД з РЗБ було проведено експериментальне визначення фізико-механічних характеристик РЗБ, зокрема міцності на стиск та модуля пружності. Для цього виконано випробування стандартних бетонних кубів і призм. Після твердіння у нормальних умовах протягом 28 днів зразки були обміряні та зважені з метою визначення густини бетону та площі навантаженої поверхні.

Таблиця 1

**Результати випробувань зразків-кубів з рециклінгового бетону**

Номер зразка	Розміри, мм	Маса, г	Густина, г/см <sup>3</sup>	Руйнівне зусилля, кН	Міцність, f <sub>c,cube</sub> , МПа
1.1	105 × 100 × 100	2270	2,162	443,75	40,149
1.2	104 × 101 × 100	2285	2,175	467,50	42,282

Таблиця 2

**Результати випробувань зразків-призм з рециклінгового бетону**

Номер зразка	Розміри, мм	Маса, г	Густина, г/см <sup>3</sup>	Руйнівне зусилля, кН	Міцність, f <sub>c,prism</sub> , МПа	Модуль пружності, E <sub>cm</sub> , ГПа
1.1	104 × 101 × 404	9265	2,183	319,50	30,42	32,16
1.2	105 × 101 × 402	9220	2,163	311,25	29,34	32,98



Рис. 2. Загальний вигляд зразків-кубів до та після випробування на стиск



Рис. 3. Загальний вигляд зразків-призм до та після випробування на визначення модулю пружності

Випробування бетонних зразків стандартних кубів та призм виконувались згідно чинних стандартів ДСТУ [12; 13] на пресі П-125. При випробуванні зразків призм на стиск навантаження прикладалося з кроком 12,5 кН. Зразки наведені на рисунках 2 та 3, результати випробувань представлено у таблицях 1 та 2. За результатами

випробувань було отримано відповідний клас бетону С32/40.

Згідно випробуваного складу бетону було закладено бетонний шар і створена композитна конструкція відповідно до розробленої схеми деревозалізобетонної панелі перекриття.

Навантаження під час випробувань прикладалося за допомогою гідравлічного преса ИПС-500. Передача зусилля від преса до зразка здійснювалася через дві точки навантаження за допомогою траверси. Схема прикладання навантаження разом із основними геометричними параметрами зразка наведена на рисунку 4.

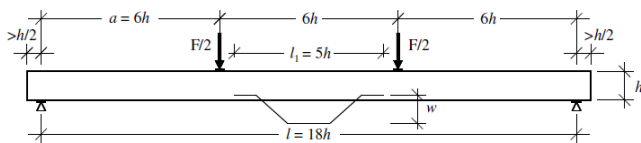


Рис. 4. Схема та геометричні параметри зразків для випробування на згин [9]

Вимірювання прогинів виконувалося за допомогою прогиномірів типу 6-ПАО, встановлених по обидві сторони плити. Загальний вигляд плити перед випробуваннями представлено на рисунку 5.



Рис. 5. Загальний вигляд конструкції перед випробуванням

**Результати.** У результаті проведених випробувань було визначено руйнівне навантаження дослідних зразків, а також встановлено характер їх руйнування, що представлено на рисунку 6.



Рис. 6. Руйнування конструкції під час випробування

Порівняння отриманих даних виконувалося на основі даних отриманих із аналогічної ПКД панелі того ж складу і серії виробництва, і була випробована відповідно до вимог чинних стандартів стандартів [14; 15]. Результати експериментальних досліджень наведені у роботі [16], де визначено основні фізико-механічні характеристики плити з ПКД, представлені в таблиці 3, у порівнянні із результатами даного експериментального дослідження.

Таблиця 3

Результати випробування зразків ПКД-панелей на згин

№ п/п	Маркування зразка	Лінійні розміри			Руйнівне навантаження, кН	Прогин при $0.6F_{max}$ , $w_e$ , мм	Час досягнення руйнівного навантаження, с
		Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм			
1	ПКД	2000	600	90	45	13,5	320
2	ПКД з РЗБ	2000	600	140	52	10,0	350

Несуча здатність експериментального зразка при згині визначається сумарним внеском міцності деревини зовнішнього розтягнутого шару та міцності бетонного шару у його розтягнутій зоні. Під час випробувань руйнування розпочиналося з утворення тріщин вздовж річних кілець деревини нижнього шару з подальшим розривом розтягнутих волокон.

Водночас у бетонній плиті зафіксовано утворення тріщин переважно спостерігалось у місцях розташування анкерних елементів. Відшарування бетонної стяжки від поверхні

плити з ПКД в момент руйнування становило приблизно 2 мм. Загальний характер руйнування конструкції наведено на рисунку 6.

Відповідно до результатів експериментальних випробувань встановлено, що руйнівне навантаження дослідженого зразка (ПКД-РЗБ) перевищує відповідний показник ПКД-панелі на 7 кН, що відповідає збільшенню приблизно на 15 %.

### Висновки

У межах дослідження було розроблено та експериментально випробувано композитну плиту з перехресно-клеєної деревини з бетонним шаром на рециклінговому заповнювачі (ПКД з РЗБ).

Експериментальні дослідження характеристик композитної панелі ПКД з РЗБ проведено відповідно до вимог національних стандартів ДСТУ та європейських нормативних документів. Дерев'яна частина конструкції виконана з панелей ПКД, виготовлених із хвойних порід деревини місцевого походження.

Бетонна частина виконана з бетонної суміші на крупному заповнювачі рециклінгового походження. Додатковим

елементом підсилення бетонного шару з крупним заповнювачем рециклінгового походження є армування у сіткою з дроту Ø1 мм, розташованої по всій площі анкерного поля.

Для визначення фізико-механічних характеристик бетонного шару було проведено випробування зразків рециклінгового бетону на стиск із використанням кубів, а також визначено модуль пружності за результатами випробувань призм. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що міцність на стиск зразків-кубів рециклінгового бетону становить 41,216 МПа, а модуль пружності – 21,379 ГПа, що відповідає класу бетону С32/40. Руйнівне навантаження композитної плити ПКД з РЗБ досягло 52 кН, що перевищує відповідний показник звичайної плити ПКД на 7 кН, або приблизно на 15 %.

Отримані дані щодо класу бетону та несучої здатності деревозалізобетонної панелі перекриття в подальшому будуть використані для скінченноелементного моделювання напружено-деформованого стану.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jayalath A., Navaratnam S., Ngo T., Mendis P. A., Hewson N., Aye L. Life cycle performance of Cross Laminated Timber mid-rise residential buildings in Australia. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 223. Pp. 110091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110091> (дата звернення : 11.01.2025).
2. Shin B., Wi S., Kim S. Assessing the environmental impact of using CLT-hybrid walls as a sustainable alternative in high-rise residential buildings. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 294. Pp. 113228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113228> (дата звернення : 11.01.2025).
3. Yin T., Song H., Wang Z., Li L., Zheng W., Ju Z., Gong Y., Gong M. Long-term creep properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Industrial Crops and Products*. 2024. Vol. 211. Pp. 118238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118238> (access date : 11.01.2025).
4. Hansen R. N. et al. Environmental consequences of shifting to timber construction : The case of Denmark. *Sustainable Production and Consumption*. 2024. Vol. 46. Pp. 54–67. URL: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.014>
5. Barbhuiya S. et al. Decarbonising cement and concrete production : Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 86. Pp. 108861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108861>
6. Esmaeildoust S., Tomlinson D., Chui Y. H. Performance of Timber-Concrete Composite (TCC) Systems Connected with Inclined Screws : A Literature Review. *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9, № 1. Pp. 13. URL: <https://doi.org/10.3390/jcs9010013> (date of access : 27.09.2025).
7. Lamothe S. et al. Lightweight and slender timber-concrete composite floors made of CLT-HPC and CLT-UHPC with ductile notch connectors. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 243. Pp. 112409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112409> (date of access : 22.08.2025).
8. ДСТУ EN 14080:2013, (EN 14080:2013, IDT). Конструкції дерев'яні. Шарувата клеєна деревина та масивна клеєна деревина. Вимоги. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). Київ, 2013.

9. ДСТУ EN 338:2022, (EN 338:2016, IDT). Конструкційний лісоматеріал. Класи міцності. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). Київ, 2022.

10. Савицький М., Смирнов А. Властивості вторинних крупних заповнювачів, отриманих в результаті подрібнення бетонних відходів. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2024. № 14. С. 19–28. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>

11. Смирнов А. С., Савицький М. В., Нікіфорова Т. Д., Бордун М. В., Титюк А. А., Федін В. А. Особливості розрахунку складу важкого бетону з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження. *Науковий вісник будівництва*. 2025. № 113. С. 166–175. DOI 10.33042/2311-7257.2025.113.1.20.

12. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ, 2010.

13. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта пуассона. [Чинний від 2009-12-22]. Вид. офіц. Київ, 2010.

14. EN 16351:2021. Timber structures. Cross laminated timber. Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels.

15. EN 408:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.

16. Шехоркіна С. Є., Бордун М. В., Мерилова І. О., Лясота О. В., Федін В. А. Експериментальне дослідження міцності перехресно-клеєної деревини. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. Вип. 2 (026). С. 140–146. URL: <https://doi.org/10.30838/ujcea.2312.270425.140.1153>

## REFERENCES

1. Jayalath A., Navaratnam S., Ngo T., Mendis P.A., Hewson N. and Aye L. Life cycle performance of Cross Laminated Timber mid-rise residential buildings in Australia. *Energy and Buildings*. 2020, vol. 223, pp. 110091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110091> (date of access : 11.01.2025).

2. Shin B., Wi S. and Kim S. Assessing the environmental impact of using CLT-hybrid walls as a sustainable alternative in high-rise residential buildings. *Energy and Buildings*. 2023, vol. 294, pp. 113228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113228> (date of access : 11.01.2025).

3. Yin T., Song H., Wang Z., Li L., Zheng W., Ju Z., Gong Y. and Gong M. Long-term creep properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Industrial Crops and Products*. 2024, vol. 211, pp. 118238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118238> (date of access : 11.01.2025).

4. Hansen R.N. et al. Environmental consequences of shifting to timber construction : The case of Denmark. *Sustainable Production and Consumption*. 2024, vol. 46, pp. 54–67. URL: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.014>

5. Barbhuiya S. et al. Decarbonising cement and concrete production : Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*. 2024, vol. 86, pp. 108861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108861>

6. Esmaeildoust S., Tomlinson D. and Chui Y.H. Performance of Timber-Concrete Composite (TCC) Systems Connected with Inclined Screws : A Literature Review. *Journal of Composites Science*. 2025, vol. 9, no. 1, pp. 13. URL: <https://doi.org/10.3390/jcs9010013> (date of access : 27.09.2025).

7. Lamothe S. et al. Lightweight and slender timber-concrete composite floors made of CLT-HPC and CLT-UHPC with ductile notch connectors. *Engineering Structures*. 2021, vol. 243, pp. 112409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112409> (date of access : 22.08.2025).

8. ДСТУ EN 14080:2013 (EN 14080:2013, IDT). Конструкції дерев'яні. Шарувата клеєна деревина та масивна клеєна деревина. Вимоги. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») [DSTU EN 14080:2013 (EN 14080:2013, IDT). Wooden structures. Glued laminated timber and solid glued structural timber. Requirements. Developer : State Enterprise «Ukrainian Scientific, Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality» (SE «UkrNDNC»)]. Kyiv, 2013. (in Ukrainian).

9. ДСТУ EN 338:2022 (EN 338:2016, IDT). Конструкційні лісоматеріали. Класи міцності. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») [DSTU EN 338:2022 (EN 338:2016, IDT). Structural timber. Strength classes. Developer : State Enterprise «Ukrainian Scientific, Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality» (SE «UkrNDNC»)]. Kyiv, 2022. (in Ukrainian).

10. Savytskyi M. and Smyrnov A. *Vlastyvosti vtrynykh krupnykh zapovnyuvachiv, otrymanykh v rezul'tati podribnennya betonnykh vidkhodiv* [Properties of recycled coarse aggregates obtained from crushed concrete waste]. *Budiveln'i konstruktsiyi. Teoriya i praktyka* [Building constructions. Theory and Practice]. 2024, vol. 14, pp. 19–28. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>. (in Ukrainian).

11. Smyrnov A., Savytskyi M., Nikiforova T., Bordun M., Tytiuk A. and Fedin V. *Osoblyvosti rozrakhunku skladu vazhkoho betonu z vykorystanniam krupnogo zapovnyuvacha retsyklinhovoho pokhodzhennya* [Features of designing the

composition of heavy concrete with the use of coarse aggregate of recycling origin]. *Naukovyy visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Civil Engineering]. 2025, no. 113, pp. 166–175. URL: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.113.1.20> (in Ukrainian).

12. DSTU B V.2.7-214:2009. *Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrol'nyimi zrazkami. Chynnyy vid 2010-09-01. Vyd. ofits.* [DSTU B V.2.7-214:2009. Building Materials. Concretes. Methods for Determining Strength Using Control Samples. Effective from 2010-09-01. Official Edition]. Kyiv, 2010. (in Ukrainian).

13. DSTU B V.2.7-217:2009. *Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya pryzmovoyi mitsnosti, modulia pruzhnosti i koefitsiyenta Puassona. Chynnyy vid 2009-12-22. Vyd. ofits.* [DSTU B V.2.7-217:2009. Building Materials. Concretes. Methods for Determining Prism Strength, Modulus of Elasticity, and Poisson's Ratio. Effective from 2009-12-22. Official Edition]. Kyiv, 2010. (in Ukrainian).

14. EN 16351:2021. Timber structures. Cross laminated timber. Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels.

15. EN 408:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.

16. Shekhorkina S., Bordun M., Merylova I., Liasota O. and Fedin V. *Eksperymental'ne doslidzhennya mitsnosti perekhresno-kleyenoyi derevyny* [Experimental investigation of the strength of cross-laminated timber]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2025, vol. 2 (026), pp. 140–146. URL: <https://doi.org/10.30838/ujcea.2312.270425.140.1153> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 11.03.2026.

Прийнято після рецензування: 10.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 658.5:005.591.6

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.136.1251

## ВИЗНАЧЕННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ОЗНАК БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО НАГЛЯДУ У КАРКАСНО-МОНОЛІТНОМУ БУДІВНИЦТВІ

ПАХОМОВ М. В.<sup>1\*</sup>, асп.,

ЗАЯЦЬ Є. І.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, проф.

<sup>1\*</sup> Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: [maximPGS@gmail.com](mailto:maximPGS@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0007-2620-3358>

<sup>2</sup> Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: [zei83dici@gmail.com](mailto:zei83dici@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7382-919X>

**Анотація. Постановка проблеми.** Забезпечення належної якості будівельно-монтажних робіт значною мірою залежить від того, наскільки раціонально організований технічний нагляд на конкретному об'єкті. На практиці процедури контролю часто застосовуються за уніфікованими схемами, майже без урахування відмінностей між об'єктами за призначенням, складністю, масштабом і класом наслідків. Це може призводити як до недостатнього контролю на складних та відповідальних об'єктах, так і до надмірних витрат ресурсів на відносно прості споруди. У чинних нормативних документах представлено окремі класифікації за класом наслідків, поверховістю, функціональним призначенням тощо, однак вони, як правило, не інтегровані в єдину систему, придатну для безпосереднього використання при плануванні організації роботи технічного нагляду. У статті запропоновано підхід до класифікації будівельних об'єктів на основі поєднання семи ключових критеріїв: класу наслідків, типу та стадії проекту, конструктивної системи, обсягу та масштабу будівництва, поверховості, функціонального призначення та розрахункового строку експлуатації. На основі цієї класифікації запропоновано диференційовану структуру організації технічного нагляду з трьома рівнями складності, що відрізняються вимогами до складу фахівців, частоти контрольних перевірок, обсягу інструментальних і лабораторних перевірок та деталізацією документування. Запропонований підхід не претендує на повну зміну існуючої системи, але може розглядатися як інструмент її уточнення та часткового вдосконалення за рахунок більш послідовного врахування характеристик конкретного об'єкта. **Мета статті** – обґрунтувати класифікацію будівельних об'єктів, яка в межах чинного законодавства може використовуватися для більш узгодженого формування параметрів організації технічного нагляду відповідно до конструктивних, функціональних, організаційних та об'ємно-просторових характеристик об'єктів. Запропонована структура не змінює нормативних вимог, а спрямована лише на впорядкування існуючих процедур контролю якості будівельно-монтажних робіт та уточнення параметрів нагляду залежно від складності об'єкта. Основна увага дослідження зосереджується на встановленні взаємозв'язку між характеристиками об'єкта – класом наслідків, типом конструктиву, функціональним призначенням, масштабом робіт – та організаційною структурою технічного нагляду, з урахуванням вимог чинних будівельних норм.

**Ключові слова:** технічний нагляд; контроль якості будівництва; класифікація будівельних об'єктів; організація будівництва; капітальне будівництво

## DETERMINATION OF CLASSIFICATION CHARACTERISTICS OF BUILDING OBJECTS FOR OPTIMIZING TECHNICAL SUPERVISION IN FRAME-MONOLITHIC CONSTRUCTION

PAKHOMOV M.V.<sup>1\*</sup>, PhD Stud.,

ZAIATS Yev.I.<sup>2</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.

<sup>1\*</sup> Department of Organization and Construction Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: [maximPGS@gmail.com](mailto:maximPGS@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0007-2620-3358>

<sup>2</sup> Department of Organization and Construction Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: [zei83dici@gmail.com](mailto:zei83dici@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7382-919X>

**Abstract. Problem statement.** Ensuring the proper quality of construction and installation works largely depends on how rationally technical supervision is organized at a specific construction site. In practice, control procedures are often applied according to unified schemes, with little consideration given to differences between projects in terms of purpose, complexity, scale, and consequence class. This may result in insufficient control at complex and critical facilities, as well as excessive use of resources for relatively simple structures. Current regulatory documents provide individual classifications by consequence class, number of storeys, functional purpose, and other parameters; however, these classifications are generally not integrated into a unified system suitable for direct application in planning the organization of technical supervision. The article proposes an approach to the classification of building projects based on a combination of seven key criteria: consequence class, project type and stage, structural system, construction volume and scale, number of storeys, functional purpose, and design service life. On the basis of this classification, a differentiated structure for organizing technical supervision with three levels of complexity is proposed. These levels differ in requirements for the composition of specialists, the frequency of inspections, the scope of instrumental and laboratory testing, and the level of documentation detail. The proposed approach does not claim to fully replace the existing system but may be considered as a tool for its refinement and partial improvement through more consistent consideration of the characteristics of a specific project. **The purpose of the article** is to substantiate a classification of building projects that, within the framework of current legislation, can be used to more coherently define the parameters for organizing technical supervision in accordance with the structural, functional, organizational, and spatial characteristics of projects. The proposed structure does not alter regulatory requirements; rather, it is aimed at systematizing existing quality control procedures for construction and installation works and clarifying supervision parameters depending on project complexity. The study focuses primarily on establishing the relationship between project characteristics – such as consequence class, structural system type, functional purpose, and scale of works – and the organizational structure of technical supervision, taking into account the requirements of current building codes and standards.

**Keywords:** *technical supervision; construction quality control; classification of building projects; construction organization; capital construction*

**Аналіз публікацій.** Питання забезпечення якості будівництва та організації контролю широко розглядаються у сучасних дослідженнях, однак у більшості наукових робіт дослідників зосереджуються переважно на окремих аспектах - технологічних, організаційних або управлінських. Так, у статті [1] наголошується, що якість робіт у будівництві визначається поєднанням технологічної точності та контролю на етапі монтажу, а автори підкреслюють потребу у системному підході: «ефективність контролю визначається не окремими операціями, а координацією всіх учасників будівельного процесу». У роботі виділено ключові фактори ризику та запропоновано конкретні інженерні заходи контролю, що демонструє важливість диференціації процедур залежно від специфіки конструктивної системи. В статті [2] аналізується вплив систем управління якістю будівельних робіт на запобігання дефектам. Автори підкреслюють, що «Quality Management System (QMS) дозволяють мінімізувати помилки за рахунок формалізації процесів та підвищення прозорості контролю», водночас зазначаючи, що стандартизовані

підходи не завжди враховують відмінності між об'єктами. Це узгоджується з метою статті, оскільки підтверджує, що уніфіковані процедури можуть бути недостатніми для складних або відповідальних споруд. У дослідженні [3] розглянуто інтегровані моделі управління якістю на підприємствах індустріального будівництва. Автори роблять висновок, що «комплексне управління якістю вимагає врахування технологічних, організаційних та проектних факторів у єдиній структурі», що підкреслює актуальність комплексної класифікації об'єктів. Стаття демонструє, що ефективність контролю значною мірою залежить від того, наскільки методи управління та нагляд адаптовані до типу конструкцій і масштабів проекту. Систематичний огляд, представлений у статті [4], узагальнює результати численних міжнародних досліджень та показує, що на якість робіт впливають різномірні групи факторів: технічні та організаційні. У роботі зазначено: «якість формується в поєднанні проектних рішень, компетенцій виконавців та рівня контролю». Огляд підкреслює необхідність інтегрованих підходів до класифікації об'єктів, що дозволяють точніше пов'язувати характеристики споруд

з вимогами до контролю. У статті [5] детально проаналізовано роль заходів контролю якості та діяльності інженерів технічного нагляду у зменшенні ризику виникнення дефектів. Автор наголошує, що будівельні проекти характеризуються високою складністю, оскільки поєднують велику кількість учасників, матеріалів і технологічних процесів, що потребують узгодженої взаємодії. Окремий акцент зроблено на тому, що інженери технагляду є ключовими виконавцями процедур контролю якості, відповідають за перевірку матеріалів, відповідність виконання робіт проєктній документації та дотримання нормативних вимог. У статті підкреслюється важливість застосування сучасних інструментів, включаючи цифрові технології та неруйнівні методи випробувань, які дозволяють своєчасно виявляти потенційні відхилення. Також розглянуто поширені причини дефектів, серед яких неточності проєктних рішень, недостатня якість матеріалів та зовнішні чинники. Представлений матеріал підкреслює практичний зв'язок між організацією системи контролю якості та кінцевими результатами будівництва.

Таким чином, розглянуті публікації підтверджують, що у сфері контролю якості будівництва існує об'єктивна потреба в удосконаленні моделей організації роботи фахівців технагляду, які враховують відмінності між об'єктами за конструктивними, функціональними та організаційними параметрами. Це створює наукове підґрунтя для розроблення класифікаційної системи.

**Результати досліджень.** Забезпечення якості будівельно-монтажних робіт залишається одним з ключових завдань сучасного будівельного виробництва. Технічний нагляд є важливим елементом системи контролю якості, яка спрямована на зменшення ймовірності виникнення дефектів, забезпечення відповідності робіт проєктній документації та чинним нормам. Разом з тим практичний досвід та нормативна база свідчать, що організація технічного нагляду часто здійснюється за

уніфікованими схемами, практично незалежно від того, чи йдеться про невеликий житловий будинок, чи про складний багатофункціональний комплекс підвищеної відповідальності.

У практиці каркасно-монолітного будівництва допущення відхилень від проєктних рішень і вимог норм на етапі виконання робіт може мати наслідки, що виходять за межі локальних дефектів. За умов недостатнього рівня технічного нагляду такі відхилення здатні накопичуватися та впливати на експлуатаційні характеристики несучих конструкцій, зокрема їхню стійкість та довговічність. У процесі подальшої експлуатації це може створювати передумови для розвитку незадовільних або аварійних станів, тоді усунення виявленого браку, як правило, потребує значних матеріальних витрат, додаткових організаційних заходів, обмеження експлуатації та застосування спеціальних технологій підсилення конструкцій. У зв'язку з цим своєчасне виявлення та попередження дефектів набуває принципового значення в системі технічного нагляду. Далі наведено приклади найбільш поширених видів браку та дефектів (рис.).

У чинній системі регулювання ключовим орієнтиром при визначенні вимог до технічного нагляду залишається клас наслідків об'єкта та кваліфікація інженера технічного нагляду, який відповідає цьому класу. Проте такий підхід, хоча й забезпечує нормативну відповідність, не розкриває організаційних аспектів подальшого здійснення технічного нагляду, не визначає відмінностей у складі залучених фахівців, періодичності контрольних перевірок чи необхідного обсягу інструментальних і лабораторних випробувань. Відтак нагляд часто обмежується формальним виконанням вимог сертифікації, тоді як об'єкти з різними конструктивними, функціональними та масштабними характеристиками потребують різного рівня організаційної деталізації та різних підходів до структурування контрольних процедур.



*Рис. Найбільш поширені види браку в каркасно-монолітних конструкціях*

У такій ситуації виникає двояка проблема. На складних та відповідальних об'єктах середній рівень контролю може виявитися недостатнім для своєчасного виявлення критичних відхилень, особливо за наявності складних конструктивних рішень, підвищеної поверховості або підвищених вимог до надійності роботи конструкцій. На простіших об'єктах, навпаки, використання розширених підходів до нагляду іноді призводить до надмірних витрат часу та ресурсів при відносно невисокому рівні ризику. Це не означає, що чинна система є недостатньо ефективною, але демонструє, що існує простір для підвищення її гнучкості та адаптивності.

Аналіз чинної нормативної бази показує, що окремі елементи класифікації об'єктів уже присутні в стандартах: виділяються класи наслідків (відповідальності), групи за поверховістю, функціональним призначенням, строком експлуатації тощо. Однак ці класифікаційні ознаки найчастіше застосовуються розрізнено і без прямого зв'язку з вибором моделі організації технічного нагляду. Таким чином, виникає потреба не стільки у створенні принципово нових класифікацій, скільки у впорядкуванні вже наявних

підходів та їх узгодженні з практичними рішеннями щодо організації контролю якості.

Методика дослідження ґрунтується на поєднанні системного аналізу, вивчення нормативно-правової бази та методів класифікації та групування. Аналіз чинних будівельних норм дав змогу систематизувати наявні класифікаційні ознаки об'єктів, які сьогодні подані фрагментарно - за класом наслідків, поверховістю, призначенням, типом конструктиву чи строком експлуатації - але не інтегровані в уніфіковану структуру, придатну для практичного застосування під час планування технічного нагляду. Системний підхід дає можливість розглядати технічний нагляд як комплекс взаємопов'язаних підсистем (організаційної, технологічної, процедурної та ресурсної) та встановити залежність їх параметрів від характеристик конкретного об'єкта будівництва. Використання методів класифікації та групування дало змогу узагальнити виявлені ознаки та узагальнити класифікаційні ознаки у структурованому вигляді, що описує взаємозв'язки між параметрами об'єкта та вимогами до організації контролю якості. У ході дослідження встановлено, що уніфіковані

підходи до технічного нагляду не завжди забезпечують достатній рівень деталізації для складних об'єктів і, навпаки, можуть призводити до надмірного навантаження на простих. На основі отриманих результатів було сформовано узагальнену диференційовану структуру вибору параметрів технічного нагляду, яка забезпечує можливість коректнішого врахування конструктивних, функціональних та організаційних характеристик споруд у межах чинного нормативного регулювання.

В основу методики, що пропонується покладено ризик-орієнтований підхід, згідно з яким об'єкт будівництва розглядається не лише з позицій його геометричних чи функціональних параметрів, а й з точки зору потенційних наслідків відмов та складності організації будівельного процесу. Клас наслідків (СС1–СС3) у цьому контексті розглядається як базовий критерій, який відображає можливу кількість людей, що перебувають в будівлі або поблизу неї, очікувані економічні втрати та рівень порушення функціонування у разі аварії. Очевидно, що об'єкти з вищим класом наслідків потребують більш детального й системного контролю, у тому числі з залученням спеціалізованих лабораторій та експертних організацій.

Другим важливим критерієм є тип і стадія проєкту. Нове будівництво, як правило, характеризується більш передбачуваними умовами виконання робіт та чітко структурованими етапами, що дозволяє планувати контроль за стандартними схемами. Роботи з реконструкції, капітального ремонту, реставрації чи посилення конструкцій пов'язані з більшим рівнем невизначеності: часто потрібні додаткові обстеження, оцінка фактичного стану несучих елементів, забезпечення сумісності нових рішень з існуючими конструкціями. Це об'єктивно підвищує вимоги до організації технічного нагляду та кваліфікації залучених фахівців.

Наступний блок критеріїв стосується конструктивної системи, масштабу та поверховості об'єкта. Каркасно-монолітні будівлі потребують посиленого контролю бетонних і арматурних робіт, режимів

твердіння, якості опалубки; збірні залізобетонні конструкції - точності монтажу та надійності стиків; металеві каркаси – якості зварних та болтових з'єднань, стану антикорозійного захисту; кам'яні та блокові будівлі - геометрії кладки та міцності розчину; дерев'яні конструкції – захисної обробки, вогнезахисту. Масштаб та площа об'єкта визначають, наскільки необхідна багаторівнева організаційна структура технічного нагляду: від одного-двох інженерів на малих об'єктах до спеціалізованих груп на великих комплексах. Поверховість пов'язана з ризиками прогресуючого руйнування, вимогами до стійкості та просторової жорсткості, що природним чином посилює вимоги до систематичності контролю.

Функціональне призначення будівлі визначає акценти технічного нагляду. Для житлових будинків важливими є комфорт, енергоефективність, акустичні, санітарно-гігієнічні параметри; для громадських будівель – безпека евакуації, доступність, надійність інженерних систем; для промислових – відповідність технологічним навантаженням, стійкість до вібрацій та агресивних середовищ; для об'єктів спеціального призначення – забезпечення функціонування в особливих режимах. Нарешті, строк експлуатації впливає на вимоги до довговічності матеріалів і конструкцій: для об'єктів з тривалим розрахунковим строком доцільно передбачати більш розгорнуті програми контролю, особливо щодо захисту від корозії та впливу навколишнього середовища.

На основі цих семи критеріїв сформовано узагальнену класифікаційну таблицю, у якій для кожної ознаки наведені типові групи об'єктів та характерні приклади. Умовно її можна подати у вигляді структури, де за рядками розташовано критерії (клас наслідків, тип/стадія проєкту, тип конструктиву, масштаб, поверховість, функціональне призначення, строк експлуатації), а за стовпцями – відповідні категорії. Така таблиця (табл. 1) не змінює нормативні класифікації, а лише систематизує їх у зручнішому для організації технічного нагляду форматі.

## Класифікація будівельних об'єктів за ключовими характеристиками

Критерій	Ознака / Тип об'єкта	Характеристики	Приклади об'єктів
<b>Клас наслідків (відповідальності)</b> (ДСТУ 8855:2019) [6]	CC1 — незначні наслідки	<ul style="list-style-type: none"> <li>До 50 осіб (постійно)</li> <li>До 100 осіб (періодично)</li> <li>До 100 осіб (зовні)</li> <li>Економічний збиток низький</li> <li>Об'єктовий рівень порушень</li> </ul>	Індивідуальні житлові будинки, малі одноповерхові споруди, адміністративні павільйони, невеликі склади
	CC2 — середні наслідки	<ul style="list-style-type: none"> <li>50–400 осіб (постійно)</li> <li>100–1 000 осіб (періодично)</li> <li>100–50 000 осіб (зовні)</li> <li>Економічний збиток середній</li> <li>Регіональний рівень порушень</li> </ul>	Громадські будівлі середньої місткості, школи, дитячі садки, невеликі лікарні, багатоповерхові житлові будинки
	CC3 — значні наслідки	<ul style="list-style-type: none"> <li>Понад 400 осіб (постійно)</li> <li>Понад 1 000 осіб (періодично)</li> <li>Понад 50 000 осіб (зовні)</li> <li>Економічний збиток високий</li> <li>Загальнодержавний рівень</li> </ul>	Лікарні, аеропорти, вокзали, критична інфраструктура, промислові комплекси підвищеної небезпеки
<b>Тип / стадія проєкту</b> (ДБН А.2.2-3:2014) [13]	Нове будівництво	Зведення з нуля на підготовленому майданчику	Житлові будинки, торговельно-розважальні центри, промислові споруди
	Реконструкція	Зміна параметрів із втручанням у конструкції	Перепланування і розширення громадських будівель, надбудови поверхів
	Капітальний ремонт	Відновлення без зміни основних параметрів	Заміна інженерних систем, усунення пошкоджень, ремонт конструктивних елементів
<b>Тип конструктиву</b>	Каркасно-монолітний	Монолітний залізобетонний каркас з діафрагмами жорсткості	Багатоповерхові житлові комплекси, адміністративні будівлі, громадські споруди
	Збірний залізобетон	Збірні залізобетонні елементи заводського виготовлення	Логістичні комплекси, виробничі будівлі, складські приміщення
	Металевий	Металевий каркас зі зварними або болтовими з'єднаннями	Промислові цехи, ангари, склади, логістичні термінали
	Кам'яний / блоковий	Кладка з цегли, блоків або каменю	Житлові будинки, офісні та громадські будівлі
<b>Обсяг і масштаб будівництва</b>	Малі об'єкти (до 1 000 м <sup>2</sup> )	Локальні одиничні споруди обмеженої площі	Індивідуальні житлові будинки, невеликі павільйони, модульні споруди

Критерій	Ознака / Тип об'єкта	Характеристики	Приклади об'єктів
	Середні об'єкти (1 000–10 000 м²)	Найбільш розповсюджені об'єкти міської забудови	Торгові центри малої площі, багатоквартирні житлові будинки, адміністративні будівлі, освітні заклади середньої місткості
	Великі об'єкти (понад 10 000 м²)	Масштабні комплексні споруди	Промислові комплекси, багатофункціональні громадські будівлі, логістичні центри
<b>Поверховість будівлі</b> (ДБН Б.2.2-12:2019) [11]	Малоповерхова (1–3 поверхи)	Низька висота забудови	Індивідуальні житлові будинки, котеджі, таунхауси, малоповерхові секційні будинки
	Середньоповерхова (4–5 поверхів)	Обмежена висотність	Малосекційні житлові будинки, малоповерхові житлові комплекси, блокована забудова
	Багатоповерхова (6–9 поверхів)	Міська забудова середньої висоти	Міські житлові будинки, житлові комплекси комфорт-класу, багатосекційні будівлі
	Підвищеної поверховості (10–16 поверхів)	Середньовисотна забудова	Сучасні житлові комплекси середньої щільності, будинки з вбудованими комерційними приміщеннями, секційні висотні комплекси до 16 поверхів
	Висотна (17+ поверхів)	Висотна забудова з підвищеними вимогами	Висотні житлові комплекси, будинки бізнес-класу, багатофункціональні висотні комплекси
<b>Функціональне призначення</b>	Житлові будівлі	Призначені для постійного або тимчасового проживання	Багатоквартирні житлові будинки, гуртожитки, малоповерхові житлові будинки
	Громадські будівлі	Призначені для масового відвідування населенням	Адміністративні будівлі, навчальні заклади (школи, садки), лікувальні заклади (лікарні, поліклініки)
	Багатофункціональні комплекси	Будівлі або комплекси, у складі яких поєднано декілька різних функцій – житлову, громадську, комерційну.	Торговельно-житлові комплекси. Житлово-офісні центри. Комплекси з торговими площами, бізнес-центром та паркінгом. Багатофункціональні міські центри (офіси + апартаменти + готель + ТРЦ)
	Промислові будівлі	Призначені для виробничої діяльності	Виробничі цехи, промислові комбінати, склади, логістичні комплекси
	Будівлі спеціального призначення	Об'єкти з особливими експлуатаційними вимогами	Захисні споруди цивільного захисту (укриття), науково-дослідні лабораторії, об'єкти критичної інфраструктури
<b>Строк експлуатації будівель та інженерних споруд</b>	Довговічні об'єкти (понад 80 років)	Об'єкти з максимальною розрахунковою довговічністю	Житлові та громадські будівлі, мости (залежно від типу), греблі, тунелі

Критерій	Ознака / Тип об'єкта	Характеристики	Приклади об'єктів
(ДБН В.1.2-14:2018) [7]	Середній строк експлуатації (40–80 років)	Об'єкти зі середньою довговічністю	Виробничі та допоміжні будівлі, складські будівлі, сільськогосподарські будівлі, резервуари для води, резервуари для нафти і нафтопродуктів, бетонні та залізобетонні димові труби, башти і щогли
	Короткий строк експлуатації (до 40 років)	Тимчасові або швидкокомтовані споруди	Мобільні збірно-розбірні будівлі, мобільні контейнерні будівлі, резервуари для хімічної промисловості, ємнісні конструкції для сипких матеріалів, теплиці

Наступним кроком є встановлення зв'язку між класифікаційними ознаками об'єкта і параметрами організації технічного нагляду. Для цієї мети запропоновано диференційовану модель, яка виділяє три узагальнені рівні складності: базовий, середній та посилений. Ці рівні не претендують на вичерпний опис усіх можливих варіантів організації контролю, але дозволяють задати орієнтири для вибору обсягу контрольних заходів залежно від профілю об'єкта.

Під параметрами організації технічного нагляду розуміється сукупність кількісних і якісних характеристик, що визначають структуру, ресурси та режим функціонування системи контролю якості на конкретному будівельному об'єкті. Ці параметри охоплюють організаційні аспекти (чисельність і кваліфікація фахівців, розподіл функцій), технологічні (частота перевірок, методи контролю, обсяг лабораторних випробувань) та процедурні елементи (порядок документування, термін реагування на дефекти, форми звітності). До ключових параметрів належать: склад групи технічного нагляду, що визначає професійний потенціал команди; насиченість контролю, яка вимірюється годинами присутності на об'єкті або періодичністю перевірок; обсяг інструментального та лабораторного контролю; глибина документування процесу. Комплексне визначення всіх параметрів для конкретного об'єкта визначає структуру організації технічного

нагляду, адаптовану до його специфічних характеристик і потенційних ризиків.

Базовий рівень доцільно застосовувати для об'єктів з невеликим масштабом, низькою поверховістю та незначними наслідками відмови, з відносно простими конструктивними схемами. У цьому випадку склад групи технічного нагляду може обмежуватися одним фахівцем широкого профілю, частота контрольних перевірок – декількома на тиждень, інструментальний та лабораторний контроль – переважно вибірковими перевірками відповідно до мінімальних нормативних вимог. Документування може мати спрощений характер, зосереджуючись на журналі робіт та актах огляду прихованих конструкцій.

Середній рівень орієнтований на міські об'єкти середньої складності: багатоквартирні житлові будинки, школи, адміністративні будівлі, невеликі торгові центри тощо. Тут доцільно формувати групу технічного нагляду з декількох спеціалістів різних напрямків (конструкції, інженерні системи, лабораторний контроль), збільшувати частоту перевірок, ширше застосовувати інструментальні методи та лабораторні випробування. Документування процесу контролю зазвичай включає повний обсяг виконавчої документації з фотофіксацією ключових етапів будівництва.

Посилений рівень стосується об'єктів з високим класом наслідків, великою площею, складними або нестандартними конструктивними рішеннями, а також робіт

на стадії реконструкції, реставрації чи посилення важливих споруд. У цьому випадку доцільно створювати розширені групи технічного нагляду з чіткою структурою, розподілом відповідальності та, за потреби, залученням незалежних експертних організацій. Контроль відповідальних конструкцій може наближатися до суцільного; широко застосовуються методи неруйнівного контролю, розширені програми лабораторних випробувань, цифрова фіксація результатів, у тому числі із

використанням інформаційних моделей будівель. Такий підхід дає змогу узгоджувати витрати на нагляд із потенційними ризиками та наслідками відмови конструкцій.

Основні параметри трьох рівнів подано у вигляді узагальненої схеми (табл. 2), де систематизовано типові характеристики об'єктів, можливий склад групи технічного нагляду, орієнтовну частоту контролю, частку інструментальних і лабораторних перевірок, вимоги до документування та цифрової фіксації.

Таблиця 2

Диференційована модель організації технічного нагляду

Параметр організації нагляду	Профіль 1: Базовий рівень	Профіль 2: Середній рівень	Профіль 3: Посилений рівень
<b>Типові характеристики об'єктів</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• СС1</li> <li>• Малі об'єкти (до 1 000 м<sup>2</sup>)</li> <li>• Малоповерхові (1–3 поверхи)</li> <li>• Прості конструктивні системи (дерев'яні, кам'яні)</li> <li>• Житлові індивідуальні</li> <li>• Нове будівництво або поточний ремонт</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• СС2</li> <li>• Середні об'єкти (1 000–10 000 м<sup>2</sup>)</li> <li>• Середньо-/багатоповерхові (4–9 поверхів)</li> <li>• Типові конструкції (каркасно-монолітні, збірні ЗБ)</li> <li>• Житлові багатоквартирні, громадські</li> <li>• Нове будівництво, капітальний ремонт</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• СС3</li> <li>• Великі об'єкти (понад 10 000 м<sup>2</sup>)</li> <li>• Підвищеної поверховості/висотні (10+ поверхів)</li> <li>• Складні конструкції, нестандартні рішення</li> <li>• Критична інфраструктура, спеціального призначення</li> </ul>
<b>Склад групи технічного нагляду</b>	1 фахівець: • Інженер-будівельник загального профілю	2-4 фахівців: • Головний інженер ТН • Інженер з конструкцій • Інженер з інженерних систем • Інженер-лаборант	5+ фахівців: • Керівник групи ТН • Провідні інженери за напрямками • Спеціалізовані експерти • Лабораторна група • Координатор документообігу
<b>Кваліфікаційні вимоги</b>	Інженер-будівельник Досвід: від 3 років	Інженер-будівельник I категорії Досвід: від 5 років	Провідний інженер або експерт Досвід: від 10 років Додаткові сертифікації
<b>Частота контролю</b>	4–6 годин/тиждень Епізодична присутність	15–25 годин/тиждень Регулярна присутність	Постійна присутність 40+ годин/тиждень Цілодобова готовність
<b>Періодичність планових перевірок</b>	1 раз на 2 тижні За ключовими етапами	2–3 рази на тиждень За графіком робіт	На кожному виконаному етапі виконання робіт
<b>Візуальний контроль</b>	Вибірковий Основні конструктивні елементи	Систематичний Усі відповідальні елементи	Суцільний 100 % конструкцій та вузлів
<b>Інструментальний контроль</b>	Вибірковий (10–15 %) За необхідності	Регулярний (25–40 %) За затвердженим графіком	Постійний (50–100 %) Відповідальні елементи – 100 %
<b>Лабораторні випробування</b>	Мінімальні нормативні: • Бетон – вибірково	Розширені за графіком: • Бетон – кожна партія • Арматурні з'єднання – 15 %	Систематичні: • Бетон – кожна партія + контрольні зразки

Параметр організації нагляду	Профіль 1: Базовий рівень	Профіль 2: Середній рівень	Профіль 3: Посилений рівень
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Розчини – за потреби</li> <li>Матеріали – сертифікати</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Зварні шви – вибірково</li> <li>Матеріали – вхідний контроль</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>З'єднання – 100 % відповідальних конструкцій</li> <li>Неруйнівний контроль – систематично</li> <li>Незалежні випробування</li> </ul>
Методи неруйнівного контролю	Не обов'язкові За запитом	Вибіркове застосування: <ul style="list-style-type: none"> <li>Ультразвуковий контроль</li> <li>Вимірювання міцності</li> </ul>	Систематичне застосування: <ul style="list-style-type: none"> <li>УЗК, радіографія</li> </ul>
Контроль прихованих робіт	Базовий: Акти приймання прихованих робіт	Акти приймання прихованих робіт з фотофіксацією	Систематичний: Акти приймання прихованих робіт з фотофіксацією
Незалежна експертиза	Не обов'язкова	За критичними вузлами: Залучення сторонніх експертів за потреби	Обов'язкова: <ul style="list-style-type: none"> <li>Незалежна лабораторія</li> <li>Експертні організації</li> <li>Технічний аудит</li> </ul>
Документування та звітність	Спрощене: <ul style="list-style-type: none"> <li>Загальний журнал робіт</li> <li>Акти приймання прихованих робіт</li> <li>Фотофіксація ключових етапів</li> </ul>	Середнє: <ul style="list-style-type: none"> <li>Повний комплект виконавчої документації</li> <li>Загальний журнал робіт</li> <li>Спеціальні журнали</li> <li>Систематична фотофіксація</li> <li>Щомісячні звіти</li> </ul>	Розширене: <ul style="list-style-type: none"> <li>Цифрова документація</li> <li>ВІМ-інтеграція</li> <li>Щотижневі звіти</li> <li>Моніторинг у реальному часі</li> </ul>
Цифрова фіксація результатів	Базова: Фото ключових етапів	Середня: Фото + відео Електронні форми перевірок	Повна: Цифровий двійник Автоматизовані системи моніторингу
Контроль відповідності проєкту	Візуальна перевірка Основні параметри	Детальна перевірка: Геодезичний контроль Порівняння з кресленнями	Посилений контроль: В паперовому вигляді Порівняння з ВІМ-моделлю
Частота вхідного контролю матеріалів	Вибірковий Перевірка сертифікатів	Регулярний Візуальний огляд + документи	Суцільний Візуальний огляд Перевірка сертифікатів
Контроль технологічних процесів	Базовий Дотримання загальних нормативних вимог	Середній контроль технологічних карт	Посилений Моніторинг всіх технологічних параметрів
Реагування на виявлені дефекти	Стандартний термін: Запис у журналі Усунення за графіком	Оперативний термін: Припис протягом 24 годин Контроль усунення протягом тижня	Негайний термін: Зупинка робіт при критичних дефектах Усунення під контролем Повторні випробування
Взаємодія з учасниками будівництва	Періодична: Наради за необхідності	Регулярна: Щотижневі наради Оперативний зв'язок	Систематична: Щотижневі координаційні наради Онлайн-комунікація Єдиний інформаційний простір
Звітування перед замовником	Місячні звіти Фінальний звіт	Щотижневі зведення Місячні детальні звіти	Щотижневі аналітичні звіти Доступ до онлайн-моніторингу

Практичне застосування запропонованого підходу можна описати як послідовність декількох кроків. Спочатку для конкретного об'єкта визначаються значення семи класифікаційних критеріїв: клас наслідків, тип і стадія проєкту, тип

конструктиву, обсяг і масштаб будівництва, поверховість, функціональне призначення, розрахунковий строк експлуатації. На основі цього формується узагальнений «профіль» об'єкта. Далі цей профіль співвідносять з типовими характеристиками

трьох рівнів організації технічного нагляду. Якщо більшість ознак відповідає певному рівню, для планування нагляду орієнтовно обирають саме його. У пограничних випадках, коли характеристики розподіляються між двома рівнями, доцільно віддавати перевагу більш «сильному» варіанту, особливо коли йдеться про об'єкти з підвищеною відповідальністю.

Запропонована класифікація не скасовує існуючих нормативних вимог і не підмінює собою чинні регламенти щодо технічного нагляду. Її завдання – надати додатковий інструмент для більш обґрунтованого й послідовного врахування характеристик об'єкта при виборі параметрів організації контролю якості. У цьому сенсі вона може бути корисною для замовників, які прагнуть аргументовано формувати бюджети на технічний нагляд; для організацій нагляду, які планують склад і завантаження своїх фахівців; для підрядників, яким важливо розуміти очікувану періодичність контролю; а також для регуляторних органів, які розглядають можливість диференційованого підходу до наглядових процедур.

Перспективи подальшого розвитку підходу пов'язані з кількісним уточненням критеріїв та можливістю запровадження - інтегрального показника складності об'єкта, що враховуватиме вагу кожної ознаки. Це дозволило б більш формалізовано обґрунтовувати вибір тієї чи іншої моделі технічного нагляду. Окремим напрямом є інтеграція класифікації з цифровими платформами управління будівництвом, де параметри об'єкта автоматично використовуються для формування рекомендацій щодо організації контролю.

Такі кроки потребують додаткових досліджень та апробації на реальних проєктах, однак вже зараз запропонована методика може бути застосована в якості орієнтовного інструменту для впорядкування підходів до технічного нагляду.

### Висновки

У статті запропоновано методикку визначення класифікації будівельних об'єктів для потреб диференціації організації технічного нагляду. Класифікація базується на семи критеріях, що відображають як нормативно закріплені особливості об'єктів (клас наслідків, поверховість, строк експлуатації), так і практично значущі параметри організації будівництва (тип і стадія проєкту, тип конструктиву, масштаб, функціональне призначення). На основі класифікаційної структури запропоновано три узагальнені рівні організації технічного нагляду – базовий, середній та посилений, – які можуть застосовуватися як орієнтири при плануванні складу групи нагляду, частоти та глибини контрольних заходів.

Запропонований підхід не претендує на радикальне реформування існуючої системи, а скоріше пропонує спосіб її часткового вдосконалення за рахунок більш узгодженого врахування характеристик об'єкта. Очікується, що його застосування може сприяти більш раціональній організації технічного нагляду, підвищенню прозорості рішень щодо обсягу контролю, створенню підґрунтя для подальших досліджень, щодо оптимізації системи управління якістю в каркасно-монолітному будівництві та підвищенні її ефективності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zheng J. Analysis on the influencing factors and control measures of construction quality of prefabricated building. *Novel Technology and Whole-Process Management in Prefabricated Building (PBSFTT 2023) : Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. Vol. 539. Pp. 245–253. DOI: 10.1007/978-981-97-5108-2\_26.
2. Okonta E. D., Okeke F. O., Ojelabi E. T., Akinola A. V. Exploring the Role of quality management practices (QMS) in mitigating Construction Failures and building collapse. *Discover Civil Engineering*. 2024. Vol. 1. Article 111. DOI: 10.1007/s44290-024-00115-6.
3. Alawag A. M., Alaloul W. S., Liew M. S., Musarat M. A., Baarimah A. O., Saad S., Ammad S. Critical Success Factors Influencing Total Quality Management In Industrialised Building System : A Case Of Malaysian Construction Industry. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. Vol. 14, iss. 1. Article 101877. DOI: 10.1016/j.asej.2022.101877.
4. Wawak S., Ljevo Ž., Vukomanović M. Understanding the Key Quality Factors in Construction Projects – A Systematic Literature Review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, iss. 24. Article 10376. DOI: 10.3390/su122410376.

5. Oni S. B. Quality Control Measures in Construction Projects. June 2025. 11 p.
6. ДСТУ 8855:2019. Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 17 с.
7. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ : Мінрегіон України, 2018. 33 с.
8. ДБН В.2.2-9:2018. Громадські будівлі та споруди. Основні положення. Актуалізований текст із Зміною № 1. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 49 с.
9. ДБН В.2.2-15:2019. Житлові будинки. Основні положення. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 42 с.
10. ДБН В.2.2-27:2025. Промислові будівлі. Видання офіційне. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2025. 38 с.
11. ДБН В.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 175 с.
12. Про авторський нагляд під час будівництва об'єкта архітектури : Постанова Кабінету Міністрів України від 11 липня 2007 р. № 903 (у ред. від 13.03.2020). *Офіційний вісник України*. 2007
13. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво (із Зміною № 1 та Зміною № 2). Міністерство розвитку громад та територій України. Київ : Укрархбудінформ, 2022. 37 с.

## REFERENCES

1. Zheng J. Analysis on the influencing factors and control measures of construction quality of prefabricated building. *Novel Technology and Whole-Process Management in Prefabricated Building (PBSFTT 2023) : Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024, vol. 539, pp. 245–253. DOI: 10.1007/978-981-97-5108-2\_26.
2. Okonta E.D., Okeke F.O., Ojelabi E.T. and Akinola A.V. Exploring the Role of quality management practices (QMS) in mitigating Construction Failures and building collapse. *Discover Civil Engineering*. 2024, vol. 1, article 111. DOI: 10.1007/s44290-024-00115-6.
3. Alawag A.M., Alaloul W.S., Liew M.S., Musarat M.A., Baarimah A.O., Saad S. and Ammad S. Critical Success Factors Influencing Total Quality Management In Industrialised Building System : A Case Of Malaysian Construction Industry. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023, vol. 14, iss. 1, article 101877. DOI: 10.1016/j.asej.2022.101877.
4. Wawak S., Ljevo Ž. and Vukomanović M. Understanding the Key Quality Factors in Construction Projects –A Systematic Literature Review. *Sustainability*. 2020, vol. 12, iss. 24, article 10376. DOI: 10.3390/su122410376.
5. Oni S.B. Quality Control Measures in Construction Projects. June 2025, 11 p.
6. *DSTU 8855:2019. Budivli ta sporudy. Vyznachennia klasu naslidkiv (vidpovidalnosti)* [Buildings and Structures. Determination of Consequence Class (Responsibility)]. Kyiv : SE “UkrNDNTs”, 2019, 17 p. (in Ukrainian).
7. *DBN V.1.2-14:2018. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh obektiv. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud* [System of Ensuring Reliability and Safety of Building Objects. General Principles of Reliability and Structural Safety of Buildings and Structures]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2018, 33 p. (in Ukrainian).
8. *DBN V.2.2-9:2018. Hromadski budivli ta sporudy. Osnovni polozhennia. Aktualizovanyi tekst iz Zminoiu no. 1* [Public Buildings and Structures. General Provisions. Updated Text with Amendment no. 1]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2022, 49 p. (in Ukrainian).
9. *DBN V.2.2-15:2019. Zhytlovi budynky. Osnovni polozhennia* [Residential Buildings. General Provisions]. Kyiv : Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2019, 42 p. (in Ukrainian).
10. *DBN V.2.2-27:2025. Promyslovi budivli. Vydannia ofitsiine* [Industrial Buildings. Official Edition]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2025, 38 p. (in Ukrainian).
11. *DBN V.2.2-12:2019. Planuvannia ta zabudova terytorii* [Planning and Development of Territories]. Kyiv : Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2019, 175 p. (in Ukrainian).
12. *Pro avtors'kyi ta tekhnichnyi nahlyad pid chas budivnytstva ob'yekta arkhitektury : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 11 lypnya 2007 r. № 903 (u red. vid 13.03.2020)* [On Architectural Author Supervision and Technical Supervision During Construction : Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 903 of 11 July 2007 (as amended on 13.03.2020)]. *Ofitsiynyy visnyk Ukrayiny* [Official Bulletin of Ukraine]. 2007. (in Ukrainian).
13. *DBN A.2.2-3:2014. Sklad ta zmist proteknoi dokumentatsii na budivnytstvo (iz Zminoiu № 1 ta Zminoiu № 2)* [Content and Scope of Design Documentation for Construction (with Amendment no. 1 and Amendment no. 2)]. Kyiv : Ukrarkhbudinform, Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2022, 37 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 28.02.2026.

Прийнято після рецензування: 10.04.2026. Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 331.101.1

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.148.1252

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЕКЗОСКЕЛЕТАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ В БУДІВНИЦТВІ ТА НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

ШАЛОМОВ В. А.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ДЕМЧЕНКО В. В.<sup>2\*</sup>, асп.,

ЖИРКОВ В. Ю.<sup>3</sup>, асп.,

ХРЯП П. Д.<sup>4</sup>, асп.

<sup>1</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 657-65-34, e-mail: [shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua](mailto:shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-6890-932X>

<sup>2\*</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 951-98-08, e-mail: [demchenko.vladyslav@365.pdaba.edu.ua](mailto:demchenko.vladyslav@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0001-1596-1010>

<sup>3</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 481-86-09, e-mail: [zhirkov.viacheslav@365.pdaba.edu.ua](mailto:zhirkov.viacheslav@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0002-2819-2094>

<sup>4</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 838-62-83, e-mail: [khriap.pavlo@365.pdaba.edu.ua](mailto:khriap.pavlo@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0003-2222-5614>

**Анотація. Постановка проблеми.** У зв'язку із постійним зростанням складності інфраструктурних проєктів та високим рівнем фізичного навантаження в будівельній галузі, виробничий травматизм залишається однією з ключових загроз, що призводить до значних людських та економічних втрат. Недосконалість традиційних методів безпеки, які мають переважно реактивний характер, зумовлює необхідність впровадження проактивних технологій. Висока інтенсивність праці та експлуатація об'єктів у складних умовах (висотні роботи, замкнені простори, об'єкти енергетики) спричиняють масовий розвиток скелетно-м'язових розладів, що становлять до 40% усіх професійних захворювань у секторі. Відсутність інтелектуальних систем моніторингу в реальному часі призводить до несвоєчасного виявлення критичної втоми працівників, теплового стресу та порушень біомеханіки рухів. Сучасний стан галузі вимагає переходу від пасивних засобів індивідуального захисту до активних роботизованих систем, таких як екзоскелети, інтегровані з алгоритмами штучного інтелекту. Окупація або руйнування промислових об'єктів, обмеження доступу до небезпечних зон та потреба у швидкому відновленні критичної інфраструктури роблять питання автоматизації та інтелектуальної підтримки фізичної праці найактуальнішим завданням сучасної охорони праці. **Мета статті** – полягає у виявленні та аналізі переваг інтеграції штучного інтелекту в конструкції промислових екзоскелетів для підвищення безпеки на об'єктах будівництва та критичної інфраструктури, визначенні технічних ризиків (таких як збої сенсорів чи помилки алгоритмів керування) та формуванні концептуальної моделі проактивного моніторингу стану працівника. Метою також є дослідження перспектив переходу від механічних систем підтримки до «розумних» Wearable AI систем, здатних прогнозувати небезпечні ситуації та автоматично коригувати рівень механічної допомоги залежно від фізіологічних показників користувача. **Висновок.** У ході аналізу потенційних небезпек при виконанні важких робіт на об'єктах критичної інфраструктури України було визначено, що основною загрозою є накопичувальний ефект фізичного перенавантаження та раптові травми через втрату координації. В умовах сучасних викликів, коли традиційний нагляд за безпекою праці обмежений динамічністю процесів, проведення моніторингу стандартними методами (анкетування, візуальний огляд) не є достатньо ефективним. Саме тому слід використовувати новітні методи з використанням автономних інтелектуальних екзоскелетів, що оснащені інерційними датчиками, біометричними сенсорами та системами комп'ютерного зору. Використання штучного інтелекту для аналізу великих даних дозволяє здійснювати скринінг фізіологічних параметрів (частота серцевих скорочень, температура тіла) та біомеханічних циклів безпосередньо під час виконання завдань. Впровадження таких апаратів є сьогодні найактуальнішим питанням не тільки для підвищення продуктивності, а й для забезпечення безпеки праці, де людина є ключовою ланкою управління. Для подальших досліджень необхідно виявити технічні можливості щодо адаптації закордонних розробок (типів Robo-Mate або Sarcos) до вітчизняних стандартів безпеки та перехід від пасивних шарнірних конструкцій до активних сервоприводних систем із інтелектуальним керуванням, що забезпечують захист від гіперекстензії суглобів та раптових збоїв системи.

**Ключові слова:** *штучний інтелект; екзоскелети; безпека праці; будівельна індустрія; об'єкти критичної інфраструктури; скелетно-м'язові розлади; проактивний моніторинг; Wearable AI; біомеханіка; охорона праці*

## APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN EXOSKELETONS TO IMPROVE LABOUR SAFETY IN CONSTRUCTION AND CRITICAL INFRASTRUCTURE

SHALOMOV V.A.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
DEMCHENKO V.V.<sup>2\*</sup>, *PhDStud.*,  
ZHyrkov V.Yu.<sup>3</sup>, *PhDStud.*,  
KHRIAP P.D.<sup>4</sup>, *PhDStud.*

<sup>1</sup> Department of Labor Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 657-65-34, e-mail: [shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua](mailto:shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-6890-932X>

<sup>2\*</sup> Department of Labor Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 951-98-08, e-mail: [demchenko.vladyslav@365.pdaba.edu.ua](mailto:demchenko.vladyslav@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0001-1596-1010>

<sup>3</sup> Department of Labor Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 481-86-09, e-mail: [zhirkov.viacheslav@365.pdaba.edu.ua](mailto:zhirkov.viacheslav@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0002-2819-2094>

<sup>4</sup> Department of Labor Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 838-62-83, e-mail: [khriap.pavlo@365.pdaba.edu.ua](mailto:khriap.pavlo@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0003-2222-5614>

**Abstract. Problem Statement.** Due to the continuous increase in the complexity of infrastructure projects and the high level of physical load in the construction industry, occupational injuries remain one of the key threats, leading to significant human and economic losses. The inadequacy of traditional safety methods, which are primarily reactive, necessitates the implementation of proactive technologies. High labor intensity and the operation of facilities in difficult conditions (high-altitude work, confined spaces, energy facilities) cause the mass development of musculoskeletal disorders, which account for up to 40 % of all occupational diseases in the sector. The absence of intelligent real-time monitoring systems leads to the untimely detection of critical worker fatigue, heat stress, and biomechanical movement disorders. The current state of the industry requires a transition from passive personal protective equipment to active robotic systems, such as exoskeletons integrated with artificial intelligence algorithms. The occupation or destruction of industrial facilities, limited access to hazardous areas, and the need for rapid restoration of critical infrastructure make the issues of automation and intelligent support of physical labor the most urgent task of modern occupational safety. **The purpose of the article** is to identify and analyze the advantages of integrating artificial intelligence into industrial exoskeleton designs to enhance safety at construction and infrastructure sites, determine technical risks (such as sensor failures or control algorithm errors), and develop a conceptual model for proactive monitoring of the worker's condition. The objective is also to study the prospects of transitioning from mechanical support systems to "smart" Wearable artificial intelligence systems capable of predicting dangerous situations and automatically adjusting the level of mechanical assistance based on the user's physiological parameters. **Conclusion.** In the course of analyzing potential hazards when performing heavy work at infrastructure sites in Ukraine, it was determined that the main threat is the cumulative effect of physical overexertion and sudden injuries due to loss of coordination. In the context of modern challenges, where traditional occupational safety supervision is limited by the dynamism of processes, monitoring using standard methods (questionnaires, visual inspection) is not effective enough. That is why the latest methods using autonomous intelligent exoskeletons equipped with inertial measurement units, biometric sensors, and computer vision systems should be used. Using artificial intelligence for big data analysis allows for the screening of physiological parameters (heart rate, body temperature) and biomechanical cycles directly during task performance. The implementation of such devices is currently the most pressing issue not only for increasing productivity but also for ensuring environmental and technogenic safety, where humans are the key link in management. For further research, it is necessary to identify the technical possibilities for adapting foreign developments (such as Robo-Mate or Sarcos types) to national safety standards and the transition from passive hinged structures to active servo-driven systems with intelligent control that provide protection against joint hyperextension and sudden system failures.

**Keywords:** *artificial intelligence; exoskeletons; occupational safety; construction industry; critical infrastructure facilities; musculoskeletal disorders; proactive monitoring; Wearable AI; biomechanics; occupational health*

**Постановка проблеми** Будівельна галузь та сектор обслуговування великих інфраструктурних об'єктів стабільно класифікуються як найбільш небезпечні сфери професійної діяльності [1-2]. Згідно

зі статистичними даними, на цей сектор припадає значна частка фатальних випадків та важких травм на виробництві. Основною причиною тривалої непрацездатності є скелетно-м'язові розлади (MSDs) (рис. 1), які

виникають внаслідок постійних маніпуляцій з важкими вантажами, незручних робочих поз та повторюваних рухів. Як зазначають дослідники проекту Robo-Mate, у країнах ЄС витрати на лікування та компенсації, пов'язані з MSDs, сягають мільярдів євро щорічно.

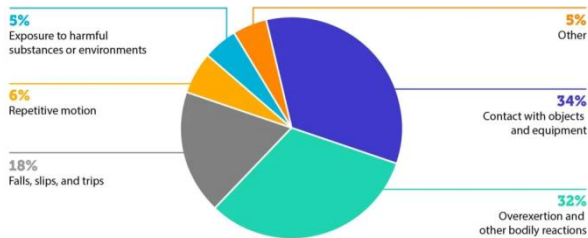


Рис. 1. Графік MSD поширеності захворюваності опорно-рухового апарату у будівництві

Традиційні системи управління охороною праці на об'єктах критичної інфраструктури та будівництва базуються на реактивному підході – аналізі інцидентів, що вже сталися. Проте в умовах сучасної цифровізації та потреби в швидкому відновленні інфраструктури, такий підхід є недостатньо ефективним. Існує критична потреба у переході до проактивного моніторингу, де небезпека ідентифікується до моменту отримання травми. Основним бар'єром тут виступає людський фактор: працівники часто ігнорують ознаки критичної втоми або теплового стресу. Впровадження екзоскелетів дозволяє механічно розвантажити тіло, але без «інтелектуальної» складової такі пристрої самі можуть стати джерелом ризику через непередбачувану взаємодію з користувачем або механічні збої.

**Аналіз публікацій.** Сучасні роботи А. Пандіта (2025) пропонують комплексну концепцію «Wearable AI», яка включає не лише механічну підтримку, а й інтегровані датчики для моніторингу здоров'я (частота серцевих скорочень (ЧСС), температура тіла) та алгоритми прогнозування ризиків [3].

Питання розробки та безпеки промислових екзоскелетів активно досліджуються провідними науковими групами. Проєкт Robo-Mate (Л. О'Салівана та ін.) став одним із перших фундаментів для розробки інтелектуальних систем

підтримки, зосередившись на ергономічних принципах та створенні стандартів безпеки для маніпуляцій з вантажами [4]. Проте на момент їхніх досліджень питання інтеграції штучного інтелекту (ШІ) перебувало на початкових етапах.

Важливий внесок у питання безпеки внесли А. Наср та Дж. Макфі (2024), які розробили настанови щодо проєктування, контролю та тестування носимих роботизованих систем, виділивши ключові технічні виклики: від гіперекстензії суглобів до помилок у моделях машинного навчання [5].

**Мета дослідження** – полягає у науковому обґрунтуванні використання алгоритмів штучного інтелекту в конструкції активних екзоскелетів для створення проактивної системи захисту працівників будівельної та інфраструктурної галузей. Дослідження спрямоване на аналіз механізмів реального часу, що дозволяють виявляти втому та коригувати зусилля пристрою, а також на ідентифікацію потенційних ризиків, що виникають при цифровій взаємодії людини та роботизованого комплексу.

**Результати досліджень.** Інтеграція інтелектуальних систем у конструкцію промислових екзоскелетів відкриває нові горизонти безпеки але водночас створює комплекс специфічних технічних викликів які потребують детального розгляду. Одним із першочергових факторів ризику є порушення механічної узгодженості між шарнірами пристрою та анатомічними суглобами людини. Будь-яке зміщення осей обертання призводить до виникнення паразитних сил які замість розвантаження створюють тиск на м'які тканини та можуть спричинити пошкодження зв'язок або гіперекстензію. Такі ситуації часто виникають через неправильне налаштування кріплень або антропометричні особливості конкретного працівника, що вимагає розробки більш гнучких адаптивних конструкцій для інфраструктурних об'єктів.

Функціональні можливості сучасних засобів індивідуального захисту значно розширюються завдяки інтеграції екосистеми носимого штучного інтелекту що детально розглядається у дослідженні Адітья Пандіта (рис. 2). Автор наводить приклад використання інтелектуальних шоломів які

поєднують у собі дисплеї доповненої реальності з датчиками газу та акселерометрами для миттєвого попередження про структурну нестабільність об'єктів або токсичні викиди. В цій же роботі описуються біометричні жилети які здійснюють безперервний моніторинг температури тіла та частоти серцевих скорочень для запобігання тепловим ударами під час інтенсивної праці на відкритих майданчиках будівельних об'єктів. Особлива увага приділяється екзоскелетам, що оснащені датчиками електроміографії для аналізу рівня м'язової втоми в реальному часі та надання адаптивної біомеханічної підтримки яка дозволяє суттєво зменшити ризик виникнення травм від повторюваних стресів.

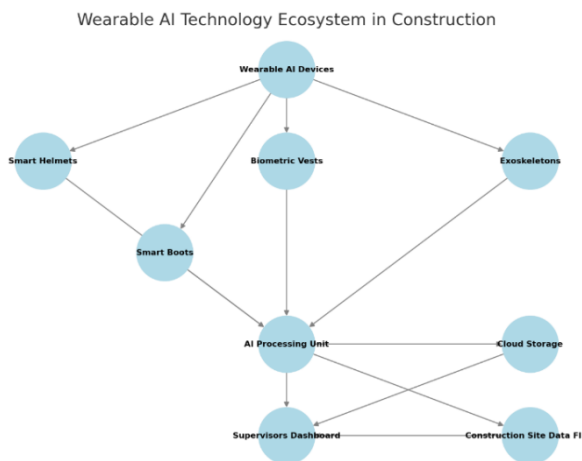


Рис. 2. Екосистема технологій носимого штучного інтелекту в будівництві

Будівельна галузь стикається з постійними загрозами від динамічних небезпек таких як падіння та обвали конструкцій або захворювання пов'язані з тепловим стресом та помилки спричинені критичною втомою персоналу. Традиційні засоби індивідуального захисту зокрема каски та жилети забезпечують лише пасивний захист і не мають здатності виявляти фізіологічні чи екологічні зміни або реагувати на них у режимі реального часу. Для подолання цих обмежень на об'єктах критичної інфраструктури розгортаються носимі технології з інтегрованим штучним інтелектом які докорінно змінюють підходи до безпеки через механізми активного моніторингу та

прогнозою аналітики. Такі системи включають біометричні датчики та алгоритми машинного навчання що вбудовані в предмети щоденного використання від шоломів до екзоскелетів. Ці пристрої здійснюють безперервний збір фізіологічних та поведінкових даних для їх обробки в реальному часі та передачі тривожних сигналів у центри управління що дозволяє здійснювати динамічні втручання з урахуванням точного розташування працівника.

Важливим етапом впровадження таких систем є розуміння функціональних особливостей кожного типу пристроїв та їх впливу на загальний рівень ризику. Розумні шоломи наприклад суттєво розширюють ситуаційну обізнаність завдяки доповненій реальності тоді як біометричні жилети дозволяють виявляти ранні ознаки серцево-судинного навантаження. Розумне взуття та браслети доповнюють цю екосистему функціями відстеження патернів ходьби та рівня кисню в крові що дає змогу ідентифікувати виснаження задовго до виникнення аварійної ситуації. Порівняльний аналіз цих технологій представлений у таблиці 1 дозволяє оцінити як ключові переваги так і технічні виклики пов'язані з їх практичною імплементацією.

Використання представлених технологій дозволяє перетворити стандартні засоби захисту на інтелектуальні вузли передачі даних які забезпечують стійкий зв'язок між працівником та керівництвом. Це створює надійну інформаційну базу для прийняття рішень щодо подальшого навчання персоналу та вдосконалення внутрішніх політик безпеки на підприємстві.

Взаємозв'язок між робочим середовищем та погіршенням стану здоров'я працівників є давно визнаним фактором у промисловому секторі. Скелетно-м'язові розлади які вражають м'язи та суглоби виступають однією з основних причин відсутності на робочому місці та передчасного виходу на пенсію через непрацездатність. Поширеність цих розладів постійно зростає в усіх професіях по всьому світу що створює значний фінансовий тягар для окремих осіб та роботодавців і загалом для економіки держав.

## Порівняльний огляд пристроїв із підтримкою штучного інтелекту в будівництві

Тип пристрою	Ключові характеристики	Переваги для безпеки	Виклики впровадження
Розумні шоломи	Доповнена реальність (AR), екологічні сенсори, геозонування	Покращення ситуаційної обізнаності, виявлення структурних загроз та газів	Висока вартість, необхідність навчання персоналу
Біометричні жилети	Датчики серцевого ритму, температури тіла та гідrataції	Виявлення ранніх ознак теплового стресу та втоми	Питання конфіденційності, обмежений термін служби батареї
Екзоскелети зі штучним інтелектом	Допомога в русі, ергономічна оптимізація, адаптивний зв'язок	Зниження скелетно-м'язових розладів, підвищення витривалості	Громіздка конструкція, висока вартість впровадження
Розумне взуття	GPS-трекінг, датчики тиску, виявлення ковзання та падіння	Запобігання інцидентам, пов'язаним із падінням, моніторинг ходи	Шуми в даних при роботі на нерівній місцевості
Браслети	Датчики SpO <sub>2</sub> , відстеження рухів, варіабельність серцевого ритму	Постійний моніторинг здоров'я, раннє виявлення виснаження	Обмежений діапазон дії сенсорів, проблеми з точністю при русі

Основними факторами ризику є ручне переміщення великих або незручних вантажів висока частота та тривалість таких операцій а також повторювані рухи та тривале перебування у незручних позах таких як нахили або скручування тулуба. З метою зниження цих ризиків роботодавцям та проєктувальникам рекомендується впроваджувати ієрархічну систему обов'язків при організації робочого простору враховуючи фізичні можливості та обмеження людського тіла.

Еволюція технологій для підтримки ручної праці пройшла шлях від механізованих інструментів та автоматизованих систем до колаборативних інтерактивних роботів і нарешті до носимих екзоскелетів.

Незважаючи на запровадження відповідного законодавства та стандартів на міжнародному та локальному рівнях розвиток таких технологій як промислові та екзоскелетні роботи відбувається набагато швидше ніж розробка нормативних вимог. У цьому контексті проєкт Robo-Mate що фінансується Європейською Комісією ставить за мету впровадження екзоскелетів у промислове середовище для посилення спроможностей працівників.

Використання таких пристроїв дозволяє зменшити навантаження на

здоров'я персоналу одночасно зберігаючи або навіть підвищуючи ефективність виробництва у будь-яких умовах де вимагається ручна праця. Консорціум проєкту об'єднає дванадцять партнерів із семи країн включаючи промислових розробників та експертів з ергономіки.

Робота в рамках проєкту Robo-Mate призвела до накопичення значних наукових знань щодо кінетики та кінематики рухів людського тіла та принципів конструювання інтелектуальних систем. На етапі розробки фахівці використовують ці дані для створення легких гнучких та зручних у використанні прототипів екзоскелетів які відповідають принципам ергономіки.

Важливим інструментом поширення результатів цих досліджень є стандартизація оскільки стандарти визнаються ключовим чинником інновацій (рис. 3). Вони забезпечують мінімально прийнятні настанови для створення безпечних та надійних продуктів які сумісні з людською формою та її можливостями. Продукція що виготовляється відповідно до таких стандартів проходить ретельне тестування що мінімізує витрати та сприяє взаємодії на європейському та світовому ринках. Стандартизація безпеки промислових екзоскелетів є необхідною для надання дизайнерам та користувачам узгодженої бази критеріїв для безпечного

проектування та експлуатації пристроїв підвищуючи впевненість роботодавців у надійності таких інноваційних рішень [4].

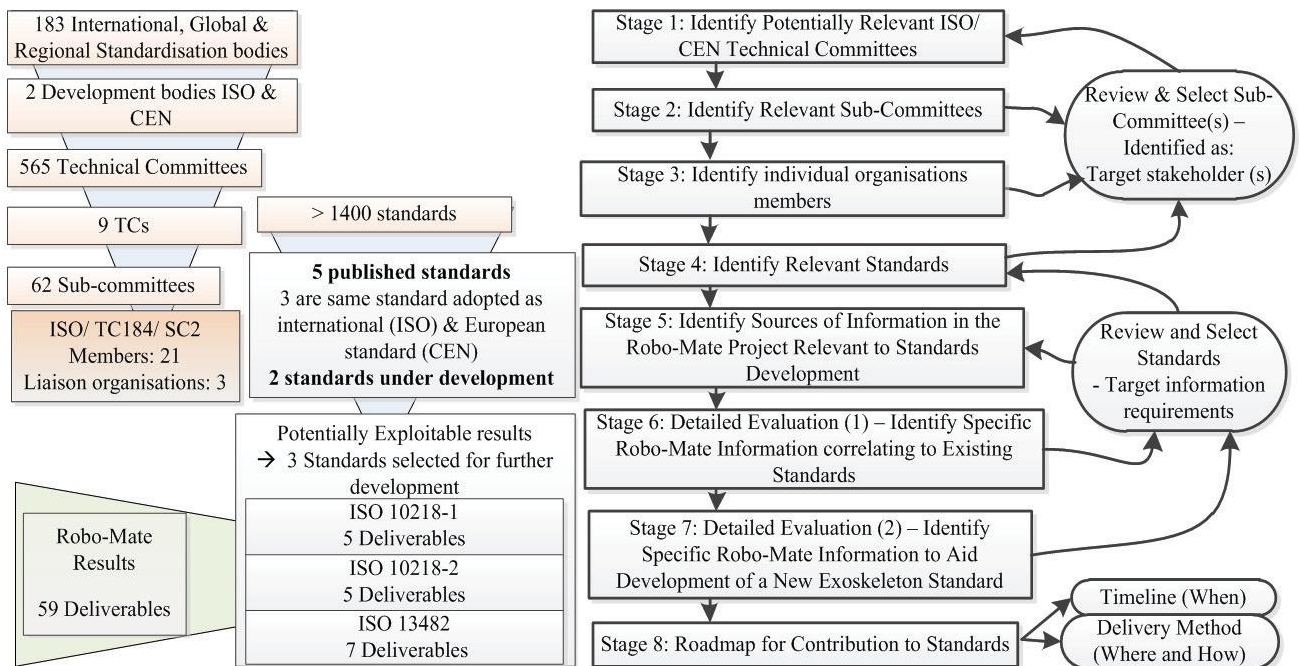


Рис. 3. Схема процесу оцінки для оптимізації розробки стандартів промислових екзоскелетів

Окрім біометричного моніторингу та загальних ергономічних переваг особливої уваги заслуговують специфічні технічні та експлуатаційні виклики які детально класифікував Алі Наср у своїх дослідженнях щодо безпеки носимої робототехніки. Він виділяє розгалужену групу механічних ризиків серед яких найбільш критичним для інфраструктурних об'єктів є порушення узгодженості між осями обертання екзоскелета та анатомічними суглобами людини. Таке зміщення призводить до виникнення небажаних паразитних сил та моментів що можуть спричинити дискомфорт або навіть серйозні травми м'яких тканин і зв'язок.

Також існує значна небезпека гіперекстензії суглобів у разі програмного збою або механічної несправності системи обмеження ходу приводів що потребує впровадження дублюючих механічних стопорів у конструкцію активних пристроїв.

На рівні систем керування Наср акцентує увагу на ризиках пов'язаних із використанням алгоритмів машинного навчання які часто діють за принципом чорної скриньки. Непрозорість прийняття

рішень такими моделями в непередбачуваних умовах будівельного майданчика може призвести до нестабільної поведінки пристрою або раптових і занадто швидких рухів приводів. Це створює загрозу втрати рівноваги та падіння працівника що особливо небезпечно при роботі на висоті або поблизу рухомих механізмів. Крім того актуальним залишається питання надійності зв'язку оскільки будь-яке відключення сенсорів або затримка в передачі даних між модулями ШІ та виконавчими механізмами може спровокувати неконтрольовану реакцію системи або її повне блокування в незручній для оператора позі.

Для мінімізації зазначених загроз Алі Наср пропонує впроваджувати комплексну стратегію валідації безпеки яка складається з кількох послідовних етапів. Першим кроком є використання багатотілесних динамічних симуляцій що дозволяють змодельовати взаємодію людини та робота у віртуальному середовищі та виявити потенційно небезпечні режими роботи без ризику для реального персоналу. Наступним обов'язковим етапом є проведення експериментів з участю людини в контурі керування (Human-In-The-Loop) які дозволяють перевірити здатність системи

адекватно реагувати на раптові зовнішні збурення або непередбачувані дії користувача. Такий підхід забезпечує високий рівень надійності активних екзоскелетів та дозволяє адаптувати алгоритми штучного інтелекту до специфічних умов експлуатації на складних об'єктах енергетики та будівництва де фактори навколишнього середовища такі як вологість або вібрації можуть суттєво впливати на роботу електронних компонентів [4].

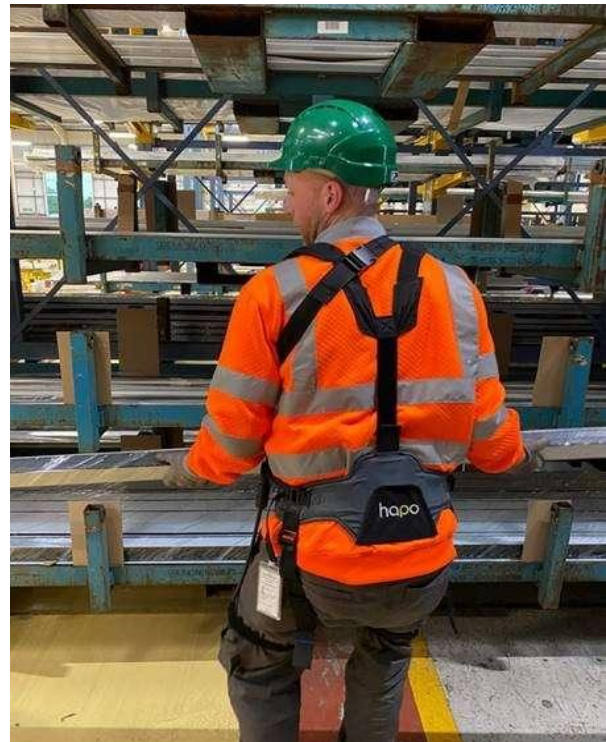
Практична ефективність екзоскелетів із підтримкою штучного інтелекту, спрямованих на запобігання втомі та проблемам зі спиною, була успішно підтверджена під час випробувань у компанії «TECHNAL UK», яка є провідним постачальником алюмінієвих віконних та фасадних систем для будівельної індустрії. Цей проєкт був реалізований за сприяння експертів з охорони праці компанії Stanley та продемонстрував реальні переваги використання роботизованих систем у динамічному середовищі складу та виробництва. Основним завданням було надання підтримки працівникам, які щоденно виконують підйом важких металевих профілів вагою до двадцяти п'яти кілограмів. Специфіка роботи вимагала від операторів низько нахилитися до стелажів, щоб підняти профілі, а потім піднімати їх на плечі для транспортування, що створювало значне пікове навантаження на поперековий відділ хребта працівників.

Випробування тривало два тижні та охоплювало працівників різних вікових категорій, зокрема представників віком понад шістьдесят та близько двадцяти років, що дозволило оцінити вплив технології на різні групи персоналу. Процес дослідження включав тижневий етап індукції для звикання до обладнання та наступний тиждень активних вимірювань із використанням сенсорів для визначення різниці в показниках до та після втручання.

Аналіз отриманих даних продемонстрував, що використання інтелектуального екзоскелета «Наро Васк» (рис. 4) дозволяє потенційно запобігти розтягненню м'язів нижньої частини спини на тридцять відсотків. Крім того,

результати аналізу показали можливість зменшення загального добового навантаження на хребет одного працівника на величину до п'яти тонн, що є критично важливим показником для довгострокового збереження працездатності.

Суб'єктивні звіти учасників випробувань повністю збіглися з об'єктивними даними датчиків, оскільки обидва працівники повідомили про миттєве полегшення та надійну підтримку спини під час зміни. Молодший працівник відзначив, що завдяки використанню екзоскелета він відчував значно меншу втому наприкінці дня та повертався додому в набагато кращому фізичному стані, висловивши повну готовність використовувати такий захист протягом кожної зміни.



*Рис. 4. Використання екзоскелета Наро Васк під час маніпуляцій з важкими металевими профілями на складі*

Керівництво компанії TECHNAL UK оцінило успіх випробувань як вагомий внесок у систему безпеки та прийняло рішення про подальше розширення використання цієї технології серед більшої кількості працівників. Цей приклад наочно демонструє, що впровадження екзоскелетів на інфраструктурних об'єктах забезпечує не лише зниження виробничих ризиків, але й безпосередньо покращує комфорт та якість

життя персоналу за рахунок точного аналізу та компенсації фізичних зусиль [6].

### Висновки

1. Встановлено, що перехід від реактивного підходу до проактивного моніторингу за допомогою технологій «Wearable AI» є критично необхідним для зниження рівня виробничого травматизму та запобігання скелетно-м'язовим розладам (MSDs). Використання інтелектуальних систем дозволяє ідентифікувати небезпечні фактори, такі як критична втома або порушення біомеханіки, до моменту настання травми.

2. Аналіз функціональних можливостей екосистеми носимого ШІ показав, що синергія різних пристроїв (розумних шоломів, біометричних жилетів та екзоскелетів) дозволяє створити цілісну систему ситуаційної обізнаності. Зокрема, використання датчиків електроміографії та інерційних вимірювальних пристроїв забезпечує адаптивну підтримку, яка підлаштовується під індивідуальні антропометричні особливості та поточний фізіологічний стан працівника.

3. Виявлено ключові технічні виклики, що супроводжують впровадження інтелектуальних екзоскелетів: необхідність суворої механічної узгодженості шарнірів з анатомією людини, стабільність алгоритмів машинного навчання в умовах «шумних» даних будівельного майданчика та питання захисту конфіденційності біометричних даних.

4. Практичне випробування екзоскелета «Наро Вак» на об'єктах компанії «TECHNAL UK» підтвердило високу ефективність технології, продемонструвавши можливість зниження навантаження на хребет до 5 тонн за зміну та зменшення ризику розтягнень м'язів нижньої частини спини на 30 %. Суб'єктивне схвалення технології працівниками різних вікових категорій свідчить про готовність галузі до адаптації таких рішень.

5. Обґрунтовано, що подальший розвиток галузі потребує прискореної стандартизації безпеки промислових екзоскелетів. Створення єдиної міжнародної бази критеріїв проектування та експлуатації, за прикладом проєкту «Robo-Mate», є необхідною умовою для масштабування технологій та підвищення довіри роботодавців до інноваційних засобів індивідуального захисту.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беліков А. С., Шаломов В. А., Кульбач А. А., Калда Г. С., Коваленко О. В., Бородіна Н. А., Третьяков О. В., Данченко Ю. М. Ергономіка в будівництві (2-ге вид.). Дніпро : Журфонд, 2022. ISBN 978-966-934-332-1.
2. Шаломов В. А., Беліков А. С., Жирков В. Ю., Хряп П. Д., Шаломов О. В. Ергономічність як фактор забезпечення безпеки під час роботи будівельних машин на прикладі екскаваторів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 5 (023). С. 160–165. URL: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.160.1105>
3. Pandit A. Integrating Wearable AI Technology for Construction Worker Safety : A Framework for Real-Time Health, Fatigue, and Risk Monitoring. *International Journal on Science and Technology (IJSAT)*. 2025. Vol. 16, iss. 1. Pp. 1–18. URL: <https://doi.org/10.71097/IJSAT.v16.i1.3154>
4. O'Sullivan L., Nugent R. and van der Vorm J. Standards for the safety of exoskeletons used by industrial workers performing manual handling activities. *Procedia Manufacturing*. 2015. Vol. 3. Pp. 1418–1425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.306>
5. Nasr A., Inkol K. and McPhee J. Safety in Wearable Robotic Exoskeletons : Design, Control, and Testing Guidelines. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2024. Vol. 16(10). P. 101011. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4066900>.
6. MEPCA Engineering. AI exoskeleton technology trial at construction supplier shows potential for reducing back injuries. 2024. URL: <https://mepca-engineering.com/ai-exoskeleton-technology-trial-at-construction-supplier-shows-potential-for-reducing-back-injuries/>

### REFERENCES

1. Bielikov A.S., Shalomov V.A., Kulbach A.A., Kalda H.S., Kovalenko O.V., Borodina N.A., Tretiakov O.V. and Danchenko Yu.M. *Erhonomika v budivnytstvi* [Ergonomics in Civil Engineering]. Dnipro : Zhurfond, 219 p. ISBN 978-966-934-332-1. (in Ukrainian).
2. Shalomov V.A., Bielikov A.S., Zhyrkov V.Yu., Khriap P.D. and Shalomov O.V. *Erhonomichnist yak faktor zabezpechennia bezpeky pid chas roboty budivelnikh mashyn na prykladi ekskavatoriv* [Ergonomics as a factor in ensuring safety during the operation of construction machines on the example of excavators]. *Ukrayins'kyi zhurnal*

*budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 5 (023), pp. 160–165. URL: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.160.1105> (in Ukrainian).

3. Pandit A. Integrating Wearable AI Technology for Construction Worker Safety : A Framework for Real-Time Health, Fatigue, and Risk Monitoring. *International Journal on Science and Technology (IJSAT)*. 2025, vol. 16, iss. 1, pp. 1–18. URL: <https://doi.org/10.71097/IJSAT.v16.i1.3154>

4. O’Sullivan L., Nugent R. and van der Vorm J. Standards for the safety of exoskeletons used by industrial workers performing manual handling activities. *Procedia Manufacturing*. 2015, vol. 3, pp. 1418–1425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.306>

5. Nasr A., Inkol K. and McPhee J. Safety in Wearable Robotic Exoskeletons : Design, Control, and Testing Guidelines. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2024, vol. 16 (10), pp. 101011. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4066900>

6. MEPCA Engineering. AI exoskeleton technology trial at construction supplier shows potential for reducing back injuries. 2024. URL: <https://mepca-engineering.com/ai-exoskeleton-technology-trial-at-construction-supplier-shows-potential-for-reducing-back-injuries/>

Надійшла до редакції: 07.02.2026 р.

Прийнято після рецензування: 05.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 624.012

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.157.1253

## СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДЕФЕКТІВ ТА ПОШКОДЖЕНЬ МЕТАЛЕВИХ НЕСУЧИХ ВЕЖ ДИМОВИХ ТРУБ ТА ЇХ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИ ЗНАЧЕННЯ

ЯРОВИЙ С. М.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ЧЕРЕДНИК Д. Л.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
ТИТЮК А. О.<sup>3</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
ДАНИЛЬЧЕНКО О. О.<sup>4</sup>, *асп.*

<sup>1\*</sup> Кафедра проектування конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. В. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-09, e-mail: [psp.nauka@gmail.com](mailto:psp.nauka@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2886-9456>

<sup>2</sup> Кафедра проектування конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. В. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-09, e-mail: [dymytrii.Cherednik@kname.edu.ua](mailto:dymytrii.Cherednik@kname.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-9049-2085>

<sup>3</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 480-18-60, e-mail: [anatol-61@ukr.net](mailto:anatol-61@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-4927-370X>

<sup>4</sup> Кафедра проектування конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. В. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +38 (067) 745-31-37, e-mail: [sasha2001danilchenko@gmail.com](mailto:sasha2001danilchenko@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0003-9434-8920>

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Металеві несучі вежі, які забезпечують підтримку високих вентиляційних та димових труб, відіграють ключову роль у технологічних процесах промислових підприємств. Їхній вихід з ладу призводить до повного припинення виробничого циклу. Протягом тривалого часу експлуатації такі конструкції піддаються впливу значних силових та динамічних навантажень, температурних перепадів і корозійних процесів. Комбінація цих факторів поступово знижує їхню довговічність, провокуючи виникнення і накопичення різних дефектів та пошкоджень. В Україні наразі відсутня достатня кількість систематизованих даних та єдиних методик для статистичної оцінки пошкоджень таких споруд, що суттєво ускладнює своєчасну діагностику і планування ефективних ремонтних заходів. На основі численних обстежень технічного стану веж проведено ідентифікацію характерних дефектів і пошкоджень, їх класифікацію за типами та масштабами, а також здійснено статистичний аналіз даних, пов'язаних із пошкоджуваністю. Встановлено гранично допустимі значення пошкоджень залежно від категорії технічного стану та виконано розподіл виявлених дефектів відповідно до рівнів небезпечності. Аналіз технічного стану металевих несучих веж, який здійснювався на основі результатів щодо їх схильності до пошкоджень, сприятиме збільшенню експлуатаційної довговічності та забезпеченню безперервної роботи промислових підприємств. Крім того, це дозволяє зменшити ризик аварійних ситуацій і подовжити термін служби зазначених конструкцій.

**Ключові слова:** *металеві несучі вежі; димові та вентиляційні труби; дефекти та пошкодження; граничні значення пошкоджень*

## STATISTICAL ANALYSIS OF DEFECTS AND DAMAGES OF METAL SUPPORTING TOWERS OF CHIMNEY PIPES AND THEIR LIMITS

YAROVIJ S.M.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
CHEREDNIK D.L.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
TYTIUK A.O.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
DANYLCHENKO O.O.<sup>4</sup>, *Postgrad. Stud.*

<sup>1\*</sup> Department of Structural Design, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-09, e-mail: [psp.nauka@gmail.com](mailto:psp.nauka@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2886-9456>

<sup>2</sup> Department of Structural Design, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-09, e-mail: [dymytrii.Cherednik@kname.edu.ua](mailto:dymytrii.Cherednik@kname.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-9049-2085>

<sup>3</sup> Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 480-18-60, e-mail: [anatol-61@ukr.net](mailto:anatol-61@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-4927-370X>

<sup>4</sup> Department of Structural Design, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +38 (067) 745-31-37, e-mail: [sasha2001danilchenko@gmail.com](mailto:sasha2001danilchenko@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0003-9434-8920>

**Abstract. Problem statement.** Metal supporting towers supporting high ventilation and chimneys are critical elements of the technological chains of industrial enterprises, so their downtime causes the entire production to stop. During a long period of operation, such structures operate under the influence of force and dynamic loads, temperature fluctuations and corrosive influences. The combination of these factors reduces the operational durability and causes the appearance and accumulation of defects and damage. In Ukraine, there is practically no sufficient amount of systematized data and unified approaches to the statistical assessment of damageability of such structures, which complicates timely diagnostics and effective planning of repair measures. This gap severely impedes the ability to perform accurate risk-based diagnostics, forecast remaining service life, and strategically plan cost-effective maintenance and repair interventions. Based on the results of numerous inspections of the technical condition of towers, characteristic defects and damage have been identified, their classification by type and size has been carried out, and statistical processing of data on damageability has been carried out. The maximum permissible values of damage have been determined depending on the category of technical condition, and the identified defects have been distributed by hazard categories. A systematic and data-driven assessment of the technical condition of metal smoke and ventilation pipes, based on the detailed results obtained from analyzing their damage patterns, will significantly contribute to increasing the structural durability and operational continuity of industrial enterprises, ultimately reducing the accident rate and predictably extending the safe service life of these critical exhaust systems.

**Keywords:** metal load-bearing towers; smoke and ventilation pipes; defects and damage; damage thresholds

**Постанова проблеми.** Металеві конструкції несучих веж, які забезпечують функціонування димових і вентиляційних труб промислових підприємств, є ключовими компонентами інженерної інфраструктури (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд веж висотою 180 м цеху азотної кислоти

Тривала експлуатація конструкцій у умовах впливу агресивних середовищ, вітрових навантажень і корозійних процесів спричиняє появу численних дефектів та пошкоджень. Це може стати причиною втрати стійкості споруд і призвести до зупинки виробничих процесів. Однак у

технічній літературі бракує достатньо систематизованих даних і єдиних підходів до статистичної оцінки пошкоджуваності таких об'єктів, що ускладнює своєчасне проведення діагностики та ефективне планування ремонтних робіт [8; 11; 12].

У літературі недостатньо інформації про ушкоджуваність металевих несучих веж. Крім того, немає статистичних даних щодо виявлених дефектів і пошкоджень конструкцій цих висотних споруд.

В результаті проведених обстежень технічного стану та експертиз з питань промислової безпеки 25 металевих несучих веж було ідентифіковано основні дефекти та пошкодження. Виявлені недоліки систематизовано відповідно до їх типів та величин. Крім того, виконано статистичний аналіз ступеня пошкоджуваності конструкцій, а також розроблено графічне представлення даних у вигляді діаграм дефектів і пошкоджень, що сприяє поглибленому розумінню їхньої природи та поширеності [5–7]. Відповідно до методичних рекомендацій [4], розроблених за участю автора, дефекти та пошкодження елементів металевих несучих веж для димових і вентиляційних труб поділяються на три категорії небезпечності. Вітчизняні нормативні документи [1–3] визначають

основні підходи до оцінки технічного стану будівель і споруд, включаючи металеві конструкції. Аналіз наукових досліджень [8–12] ] свідчить про актуальність та важливість вивчення питань довговічності таких веж, класифікації дефектів та систематизації статистичних даних щодо їх пошкоджень. Це є ключовою умовою для своєчасного прийняття рішень стосовно ремонту, реконструкції або заміни конструктивних елементів.

**Метою дослідження** є систематизація та узагальнення результатів оцінки технічного стану металевих несучих веж, що виконують функцію підтримки димових і вентиляційних труб промислових підприємств. Основна увага приділяється ідентифікації ключових типів дефектів і пошкоджень, їх класифікації за характером прояву та рівнем потенційної небезпечності, а також проведенню статистичного аналізу пошкоджуваності елементів конструкцій на основі натурних досліджень. Робота зосереджена на детальному аналізі впливу конструктивних характеристик, таких як форма поперечного перерізу елементів, на інтенсивність розвитку дефектів у конструкціях. Додатково вивчається обґрунтування ефективності окремих конструкторських рішень, що сприяють підвищенню довговічності споруд. Одним із ключових завдань є класифікація дефектів за рівнем їх небезпечності та визначення гранично допустимих значень на основі чинних нормативних документів, що дає можливість здійснити комплексну оцінку технічного стану об'єктів і розробити практичні рекомендації щодо усунення виявлених пошкоджень, а також зменшення ризику їх подальшого розвитку.

**Результати.** У процесі оцінювання технічного стану та здійснення експертиз, пов'язаних із промисловою безпекою, було проведено обстеження понад 25 металевих веж. У результаті цього було зафіксовано характерні види дефектів і пошкоджень.

На основі отриманих даних визначено основні типи дефектів і ушкоджень, притаманних металевим опорним конструкціям веж, призначеним для димових і вентиляційних труб:

– руйнування захисного лакофарбового покриття, яке охоплює понад 30 % площі поверхні елементів решітки, включає такі прояви, як тріщини, лущення, розшарування та відсутність антикорозійного шару (дефект 1, рис. 2);

– корозійне зношення елементів вежі, яке перевищує 10 % (дефект 2);

– елементи решітки, які були видалені в процесі експлуатації або не встановлені на етапі монтажу (дефект 3), можуть свідчити про порушення технологічних норм або недбалість під час проведення монтажних робіт;

– локальні деформації (згини) елементів решіткової конструкції вежі (дефект 4);



*Рис. 2. Пошкодження захисного лакофарбового покриття, що перевищує 30 % загальної площі поверхні вежі*



*Рис. 3. Міжцилінна корозія виникла між парними кутиками розпірки вежі, що призвело до руйнування зварних швів*



Рис. 4. Понаднормовий проміжок між елементом діафрагми вежі і ковзним упором труби

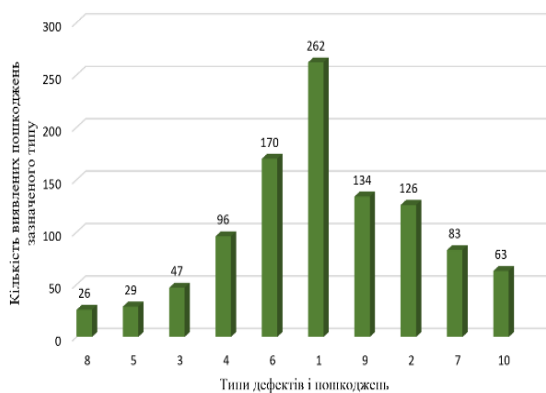


Рис. 5. Пошкоджуваність несучих конструкцій витяжних веж

- тріщини в зварних швах та руйнування зварних з'єднань кріплення елементів решітки (дефект 6, рис. 4);
- втрата стійкості фасонок опорних розкосів вежі (дефект);
- деформація несучих та огорожувальних елементів башти, а також анкерних болтів (дефект 9, рис. 5);
- міжщільнна (міжпакента) корозія елементів вежі (дефект 5, рис. 3);
- пошкодження опор на діафрагмах вежі, що утримують димову трубу у фіксованому положенні, а також значні проміжки між самою трубою та опорами (дефект 7, рис. 4);
- тріщини в бетоні фундаментів, руйнування бетону фундаменту та замонолічування несучої металевої балки під вежу (дефект 10).

Причини виникнення дефектів і пошкоджень у конструктивних елементах несучих веж здебільшого аналогічні до тих,

які спостерігаються у металевих трубах. Водночас вони вирізняються тим, що у замкнених елементах конструкції відсутній вплив температурних коливань і корозійних процесів зсередини.

Виявлені дефекти та пошкодження поділено за типами та розмірами, проведено статистичний аналіз частоти їх появи, а також побудовано відповідні діаграми (рис. 5).

Одним із найбільш типових видів пошкоджень елементів металевих гратчастих веж є деградація захисного лакофарбового покриття та утворення поверхневої корозії металу в конструкціях. Розподіл площі пошкоджень варіюється залежно від висоти споруди, що обумовлено різним рівнем агресивності впливу зовнішнього середовища (рис. 3).

Максимальні прояви корозійних уражень відзначаються в нижній частині вежі, у безпосередній близькості до промислових цехів і установок, де спостерігається найбільший рівень агресивності навколишнього середовища. У верхніх ділянках інтенсивність корозійних процесів поступово зменшується внаслідок зниження впливу агресивних факторів.

Тріщини та руйнування зварних швів, що забезпечують закріплення елементів решітки, зумовлені тривалим впливом динамічних вітрових навантажень, ставлять під загрозу структурну цілісність конструкції. Усунення таких дефектів має здійснюватися негайно після їх виявлення.

При експлуатації веж у середовищі з високою агресивністю (швидкість корозії близько 1 мм на рік) продукти корозії, що накопичуються в міжщільнному просторі, можуть призводити до руйнування зварних швів (рис. 3).

Розбіжності між ковзним упором та елементами діафрагми труби, що перевищують проектні показники, під впливом вітряних навантажень і зміни температур можуть призвести до їх виведення з експлуатації та втрати стійкості конструкції труби (рис. 4).

Втрату стійкості фасонок опорних розкосів вежі зазвичай спричиняють вібраційні навантаження та конструктивні

недоліки вузлів. Такий дефект може призвести до втрати стійкості як окремого елемента, так і всієї конструкції вежі. При виявленні цієї проблеми необхідно негайно здійснити посилення фасонки.

Руйнування бетонних фундаментів спричиняється корозією арматури та хомутів через недостатню морозостійкість і водонепроникність бетону.

Корозійний знос металевих конструкцій несучих веж у процесі тривалої експлуатації значною мірою визначається формою поперечного перерізу їхніх елементів. На основі польових обстежень витяжних веж виконано аналіз ушкоджень елементів із різними типами перерізів, у яких рівень корозійного зносу перевищує 10 %.

У дослідженні розглядалися елементи з такими типами поперечного перерізу: круглий (замкнений) із труб, тавровий та хрестовий із кутиків, а також елементи, виготовлені з прокатних двотаврів, швелерів і зварних двотаврових профілів. На рисунку 6 представлено діаграму пошкоджуваності елементів веж з різними типами поперечного перерізу за умови корозійного зносу понад 10 %.

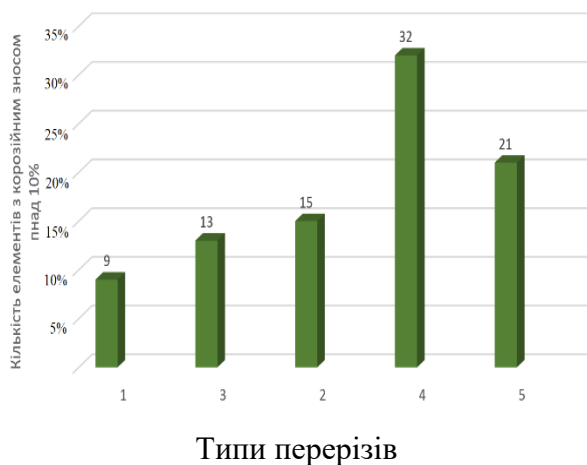


Рис. 6. Ступінь пошкодження елементів вежі з різними поперечними перерізами при корозії, яка перевищує 10 %:

1 – елементи трубчатого перерізу; 2 – елементи таврового перерізу; 3 – елементи хрестового перерізу з кутиків; 4 – елементи двотаврового складеного перерізу; 5 – елементи з прокатних двотаврів і швелерів

Варто зазначити, що аналіз цих даних ускладнюється різною кількістю веж з

неоднаковими типами перерізів поясів, а також розбіжностями у тривалості та умовах їх експлуатації. Незважаючи на це, результати однозначно свідчать, що елементи з круглим перерізом демонструють найнижчий рівень корозійного зносу, тоді як найбільші пошкодження виявлено у таврових і хрестових елементів, виготовлених із кутиків. Це підтверджує доцільність застосування круглого замкненого перерізу для несучих елементів поясів веж, що гарантує рівностійкість та високу корозійну стійкість.

На підставі результатів обстежень металевих веж усі виявлені недоліки й руйнування були класифіковані з огляду їхнього технічного стану, категорії небезпеки і залежно від цих показників визначені їх гранично допустимі величини та узагальнені у вигляді таблиці 1 [3].

У таблиці подано способи виявлення та типові ознаки виникнення дефектів і руйнувань, а також описано заходи, спрямовані на запобігання їх подальшому прогресуванню. Усі зареєстровані дефекти та руйнування класифіковано за трьома категоріями небезпеки - «А», «Б» та «В»

На підставі даних таблиці можна зробити висновок, що наявність дефектів категорії «В» вказує на перший (I, нормальний) або другий (II, задовільний) технічний стан конструкції. Виявлення ж дефектів категорії «Б» свідчить про третій стан (III, непридатність до нормальної експлуатації).

Дефекти категорії «А» визначають аварійний технічний стан конструкції. До цієї категорії належать найбільш небезпечні пошкодження, що безпосередньо загрожують цілісності та несучої здатності металевих веж.

До категорії «А» віднесено:

– корозійний знос несучого металу загалом > 30 %; локальна інтенсивна корозія зі зносом > 70 % у найбільш навантажених та вразливих вузлах: опори, фланці, кріплення допоміжних конструкцій (світлофорних майданчиків, драбин);

Таблиця 1

**Дефекти та пошкодження металевих веж, що підлягають контролю,  
та їх гранично допустимі величини**

№ п/п	Дефекти або пошкодження	Гранично допустимі значення при технічному стані			
		Нормальному (I)	Задовільному (II)	непридатному для нормальної експлуатації(III)	аварійному (IV)
		Категорії небезпечності дефектів			
		«В»		«Б»	«А»
1	Відхилення осі вежі $f$ від вертикалі	$f \leq (0,006-0,008)H$	$f \leq 0,006-0,008)H$	Встановлюється розрахунком	Значення більші розрахункових
2	Тріщини в основному металі і зварних швах елементів веж	Не допускаються			Наявні
3	Вм'ятини на поверхні елементів вежі, відхилення від проектних розмірів	Не більше 1 % розміру у розглядуваному перерізі	Встановлюються розрахунком		Значення більші розрахункових
4	Корозійний знос елементів вежі в опорній частині, у зоні фланцевих з'єднань, у місцях кріплення світлофорних майданчиків і драбин	Не допускається	До 15 % площі перерізу елемента	Встановлюється розрахунком	Понад 50 % площі перерізу елемент
5	Наскрізні руйнування і прогари стінки труби	Не допускаються	Не допускаються	Наявні	Наскрізні руйнування і прогари стінки труби
6	Руйнування антикорозійного покриття	Не допускається	До 40 % площі покриття	Понад 40 % площі покриття	100 % площі покриття
7	Пошкодження горизонтальних ковзних упорів (труби у вежі)	Не допускається	Не більше одного	Не більше двох на різних рівнях	Два і більше на одному рівні, більше двох на різних рівнях

– наявність тріщин та наскрізних пошкоджень: тріщини в основному металі несучого елемента; тріщини в зварних швах (кріпильних, монтажних, конструктивних); наскрізні отвори або розриви в тілі елементів вежі, що виникли внаслідок корозії чи механічного пошкодження;

– зріз болтів, що виконують несучу функцію в з'єднаннях елементів;

– втрату локальної стійкості (випирання) фасонки та стержневих елементів;

– дефекти або руйнування горизонтальних ковзних упорів, що

забезпечують фіксацію стовбура труби в металевій вежі;

– дефекти або руйнування вузлів підвісу (опорних вузлів) в основі вежі та елементів демпфіруючих пристроїв (гасителів коливань).

Критичні дефекти категорії «А», що загрожують руйнуванням, необхідно усувати негайно.

Усування дефектів та пошкоджень категорії «В», а також окремих незначних дефектів категорії «Б», проводиться на підставі технічної документації, розробленої проектно-конструкторськими підрозділами експлуатуючої організації.

Ліквідація дефектів категорії «А» та пошкоджень категорії «Б» з ризиком швидкого переходу до вищої категорії здійснюється виключно за проектно-кошторисною документацією на капітальний ремонт, розробленою профільними організаціями після комплексного технічного обстеження всіх вузлів та елементів вежі.

### Висновки

На основі аналізу результатів численних обстежень металевих несучих веж димових та вентиляційних труб було виявлено та класифіковано основні типи дефектів і пошкоджень, що виникають внаслідок тривалої експлуатації під впливом силових, динамічних, температурних навантажень та корозійних факторів.

Проведено класифікацію та подальший статистичний аналіз основних дефектів і

пошкоджень елементів металевих несучих веж та їх залізобетонних фундаментів за характером прояву та величиною.

Отримані дані були систематизовані відповідно до категорій технічного стану конструкції та категорій небезпечності виявлених дефектів.

Для кожної категорії технічного стану та кожного рівня небезпечності були встановлені гранично допустимі значення параметрів дефектів і пошкоджень.

Результати досліджень дозволяють обґрунтувати можливість подальшої безпечної експлуатації несучих металевих веж, встановити гранично допустимі параметри пошкоджень для різних категорій технічного стану та небезпечності, а також забезпечити їх довговічність у складних експлуатаційних умовах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування зі зміною № 1. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 105 с.
2. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд із зміною № 1. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 36 с.
3. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування із зміною № 1 та № 2. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2020. 72 с.
4. ДСТУ 9273:2024. Настава щодо обстеження будівель та споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ, 2024.
5. Яровий С. М., Савицький М. В., Слободянюк С. О. Забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж. *Опір матеріалів та теорія споруд*. Вип. 106. Київ : КНУБА, 2021. С. 120–146.
6. Яровий С. М., Ярова О. В. Довговічність металевих димових і вентиляційних труб за критеріями механіки руйнування. *Науковий вісник будівництва*. Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2021. Вип. 3 (105). С. 115–122.
7. Яровий С. М., Яровий Ю. М., Титюк А. О., Данильченко О. О. Пошкоджуваність металевих вентиляційних і димових труб та їх статистичний аналіз. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 6 (030). С. 149–155.
8. Pisarek Z. Failure of a Steel Boiler Chimney Caused by Corrosion of the Structural Shell Plate. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 99. Pp. 45–53.
9. Ellingsen O. M., Larsen T., Skallerud B., Hjorth-Hansen E. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023. Vol. 233. Article 105310.
10. Malik A. U., Al-Muaili F., Al-Ayashi M., Meroufel A. An Investigation on the Corrosion of Boiler Stack Components in Aggressive Environments. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2013. Vol. 1. Pp. 200–208.
11. Cook R., Henshall J. Inspection and Condition Assessment of Tall Steel Chimneys and Lattice Towers. *Structural Engineering International*. 2018. Vol. 28, issue 3. Pp. 345–352.
12. Holický M., Marková J. Reliability Assessment of Existing Steel Structures Based on Inspection Data. *Engineering Structures*. 2014. Vol. 68. Pp. 59–67.

### REFERENCES

1. *DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya zi zminoyu № 1* [DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Standard design from change no. 1]. Kyiv : Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine, 2022, 105 p. (in Ukrainian).

2. *DBN V.1.2-14:2018. Zahal'ni pryntsyipy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud iz zminoyu № 1* [DBN V.1.2-14:2018. The fundamental principles of ensuring reliability and constructive safety continued to emerge from change no. 1]. Kyiv : Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine, 2022, 36 p. (in Ukrainian).
3. *DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya iz zminoyu № 1 ta № 2. Chinniy z 2007-07-01* [DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennya and pour in. Design standards based on changes no. 1 and no. 2. Valid from 2007.07.01]. Kyiv : Ministry of Regional Development and Life of Ukraine, 2020, 72 p. (State Standards of Ukraine). (in Ukrainian).
4. *DSTU 9273:2024. Nastanova shchodo obstezhennya budivel' ta sporud dlya vyznachennya ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu* [DSTU 9273:2024. Installance of careful development of materials for the identification and assessment of their technical state]. Kyiv, 2024. (in Ukrainian).
5. Yarovy S.M., Savytskyi M.V. and Slobodyanyuk S.O. *Zabezpechennya nadiynosti metalevykh dymovykh i ventilyatsiynykh trub ta yikh nesuchykh vezh* [Ensuring the Reliability of Metal Smoke and Ventilation Pipes and Their Supporting Towers]. *Opir materialiv ta teoriya sporud* [Strength of Materials and Theory of Structures]. Issue 106, Kyiv : KNUBA, 2021, pp. 120–146. (in Ukrainian).
6. Yarovy S.M. and Yarova O.V. *Dovhovichnist' metalevykh dymovykh i ventilyatsiynykh trub za kryteriyamy mekhaniky ruynuvannya* [Durability of Metal Smoke and Ventilation Pipes According to the Criteria of Fracture Mechanics]. *Naukovyy visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Civil Engineering]. Issue 3 (105), Kharkiv : KhNUBA, KHOTV ABU, 2021, pp. 115–122. (in Ukrainian).
7. Yarovy S.M., Yarovy .Yu.M., Tytyuk A.O. and Danylchenko O.O. *Poskodzhuvanist' metalevykh ventilyatsiynykh i dymovykh trub ta yikh statystychnyy analiz* [Damageability of metal ventilation and chimney pipes and their statistical analysis]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2025, no. 6 (030), pp. 149–155. (in Ukrainian).
8. Pisarek Z. Failure of a Steel Boiler Chimney Caused by Corrosion of the Structural Shell Plate. *Engineering Failure Analysis*. 2019, vol. 99, pp. 45–53.
9. Ellingsen O.M., Larsen T., Skallerud B. and Hjorth-Hansen E. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023, vol. 233, article 105310.
10. Malik A.U., Al-Muaili F., Al-Ayashi M. and Meroufel A. An Investigation on the Corrosion of Boiler Stack Components in Aggressive Environments. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2013, vol. 1, pp. 200–208.
11. Cook R. and Henshall J. Inspection and Condition Assessment of Tall Steel Chimneys and Lattice Towers. *Structural Engineering International*. 2018, vol. 28, iss. 3, pp. 345–352.
12. Holický M. and Marková J. Reliability Assessment of Existing Steel Structures Based on Inspection Data. *Engineering Structures*. 2014, vol. 68, pp. 59.

Надійшла до редакції: 11.02.2026.

Прийнято після рецензування: 10.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

УДК 624.05:004.94

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.165.1254

## ПІДГОТОВЧИЙ ЕТАП БУДІВНИЦТВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ

СОПІЛЬНЯК А. М.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
СІРЕНОК К. О.<sup>2</sup>, асп.

<sup>1\*</sup> Кафедра нарисної геометрії та графіки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-80, e-mail: [sopilniak.artem@pdaba.edu.ua](mailto:sopilniak.artem@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3067-0529>

<sup>2</sup> Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-80, e-mail: [sirenok.kyrylo@pdaba.edu.ua](mailto:sirenok.kyrylo@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-1231-2338>

**Анотація. Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток технології будівельного 3D-друку зумовлений зростаючою потребою у швидкому та економічно ефективному зведенні будівель і споруд. Дефіцит кваліфікованих трудових ресурсів, необхідність відновлення пошкодженого житлового фонду та підвищення продуктивності будівельних процесів актуалізують впровадження адитивних технологій у практику будівництва. Попри наявність реалізованих об'єктів у різних країнах, технологія залишається недостатньо регламентованою, а більшість технічних рішень мають експериментальний характер. У зв'язку з цим особливої уваги потребує підготовчий етап будівництва, що передбачає узгодження параметрів матеріалів, цифрового моделювання та налаштування обладнання в межах чітко структурованого підходу. **Мета.** Метою статті є визначення та систематизація основних аспектів підготовчого етапу будівництва із застосуванням технології будівельного 3D-друку, а також оцінка можливості адаптації методик випробувань, регламентованих нормативними документами традиційного будівництва, до умов адитивного виробництва. **Висновок.** У роботі систематизовано складові підготовчого етапу будівництва з урахуванням специфіки технології будівельного 3D-друку та обґрунтовано необхідність комплексного узгодження матеріальних, технологічних і цифрових параметрів процесу. За результатами експериментальних досліджень встановлено вплив вмісту води на екструзійну придатність і міцність матеріалу. Показано, що цифрове моделювання та формування керуючих програм повинні здійснюватися з урахуванням технічних можливостей обладнання, а узгодження геометричних і технологічних параметрів є необхідною умовою забезпечення стабільності процесу друку. Отримані результати підтверджують доцільність системного підходу до організації підготовчого етапу будівництва із застосуванням адитивних технологій та окреслюють напрями їх подальшої стандартизації.

**Ключові слова:** будівельний 3D-друк; адитивні технології; відновлення пошкоджених будівель; програмне забезпечення для 3D-друку; підготовчий етап будівництва

## PREPARATORY STAGE OF CONSTRUCTION USING 3D PRINTING TECHNOLOGY

SOPILNIAK A.M.<sup>1\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
SIRENOK K.O.<sup>2</sup>, PhD Stud.

<sup>1\*</sup> Department of Descriptive Geometry and Graphics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-80, e-mail: [sopilniak.artem@pdaba.edu.ua](mailto:sopilniak.artem@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3067-0529>

<sup>2</sup> Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-80, e-mail: [sirenok.kyrylo@pdaba.edu.ua](mailto:sirenok.kyrylo@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-1231-2338>

**Abstract. Problem statement.** The rapid development of building 3D printing technology is driven by the growing demand for fast and cost-effective construction of buildings and structures. The shortage of qualified labor, the need to restore damaged housing stock, and the requirement to increase construction productivity necessitate the implementation of additive technologies in construction practice. Despite the existence of completed projects in various countries, the technology remains insufficiently regulated, and most technical solutions are still experimental in nature. Therefore, particular attention should be paid to the preparatory stage of construction, which involves the coordination of material parameters, digital modeling, and equipment setup within a clearly structured approach. **Purpose.** The purpose of this

article is to identify and systematize the key aspects of the preparatory stage of construction using building 3D printing technology, as well as to assess the possibility of adapting testing methods regulated by conventional construction standards to the conditions of additive manufacturing. **Conclusions.** The study systematizes the components of the preparatory stage of construction considering the specifics of building 3D printing technology and substantiates the necessity of integrated coordination of material, technological, and digital parameters. Experimental results confirm the influence of water content on extrusion performance and compressive strength of the material. It is demonstrated that digital modeling and print control program generation must take into account the technical capabilities of the equipment, while the coordination of geometric and technological parameters is essential for ensuring process stability and dimensional accuracy. The findings confirm the feasibility of a systematic approach to organizing the preparatory stage of construction using additive technologies and outline directions for their further standardization.

**Keywords:** *building 3D printing; additive technologies; restoration of damaged buildings; 3D printing software; preparatory stage of construction*

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток і активне впровадження технології будівельного 3D-друку у світі відбувається на тлі зростання потреби в швидкому та економічно ефективному зведенні об'єктів. Збільшення чисельності населення, дефіцит кваліфікованої робочої сили, а також необхідність відновлення зруйнованого житлового фонду зумовлюють пошук інноваційних рішень у будівельній галузі. Одним із таких рішень є застосування адитивних технологій, що дозволяють автоматизувати окремі технологічні процеси та скоротити строки виконання робіт.

На сьогодні об'єкти, зведені методом будівельного 3D-друку, реалізуються в ряді країн, що підтверджує практичну можливість та технологічну доцільність використання даного підходу. Водночас, попри наявність позитивного досвіду, технологія залишається недостатньо регламентованою на нормативному рівні. Значна частина технічних рішень має експериментальний або індивідуальний характер, що ускладнює стандартизацію процесів та стримує її широкомасштабне впровадження.

Особливого значення в умовах переходу від експериментального застосування до системного впровадження технології набуває підготовчий етап будівництва, оскільки саме на цьому етапі закладаються основні організаційно-технологічні рішення, що визначають подальший розвиток усього процесу зведення об'єкта. Узгодження параметрів матеріалів, цифрового моделювання та налаштування обладнання повинно здійснюватися в межах чітко структурованого підходу.

**Аналіз публікацій.** Питання застосування технології будівельного 3D-друку активно висвітлюються у сучасних наукових дослідженнях, де основну увагу зосереджено на реологічних властивостях сумішей, параметрах екструзії та забезпеченні формостійкості надрукованих конструкцій. Так у роботі [6] узагальнено технологічні проблеми екструзійного 3D-друку на основі аналізу літературних джерел і експериментальних досліджень, проведених у Великій Британії, Франції, Данії та США. Авторами визначено критично важливі взаємозв'язки між властивостями матеріалів, виробничими параметрами та проєктними рішеннями, а також окреслено напрями подальших досліджень у цій сфері.

Серед вітчизняних науковців проблематику матеріалів для будівельного 3D-друку досліджував професор Микола Савицький. Так, в роботі [5] здійснено оцінювання фізико-механічних характеристик бетонів шляхом випробування зразків-кубів, відібраних безпосередньо з надрукованих конструкцій, а також виготовлених в інвентарних формах, що дало можливість встановити вплив технології пошарового формування на показники міцності матеріалу.

У низці досліджень [1; 2; 9] також представлено результати розроблення спеціалізованих сумішей для 3D-друку з підвищеними показниками екструзійної придатності та ранньої міцності. Водночас застосування таких матеріалів може супроводжуватися збільшенням трудомісткості, вартості та логістичних

ускладнень через використання спеціалізованих або малодоступних компонентів.

Таким чином, аналіз наукових публікацій свідчить про активний розвиток матеріалознавчих і технологічних аспектів будівельного 3D-друку, тоді як питання комплексної організації підготовчого етапу будівництва з урахуванням узгодження матеріальних, технологічних і цифрових параметрів потребують подальшої систематизації, що й зумовлює актуальність даного дослідження.

#### **Мета статті та задачі дослідження.**

Метою даної статті є розгляд та викладення основних аспектів підготовчого етапу будівництва з використанням технології 3D-друку, дослідження окремих фізико-механічних характеристик матеріалів з використанням методик регламентованих нормативними документами традиційного будівництва та оцінка можливості їх адаптації до умов адитивного виробництва.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

– Проаналізувати склад і зміст робіт підготовчого етапу будівництва за традиційною технологією та визначити перелік робіт з урахуванням застосування будівельного 3D-друку.

– Визначити фізико-механічні характеристики матеріалів, що є визначальними для технології екструзійного друку, шляхом проведення лабораторних випробувань та апробації на спеціалізованому обладнанні.

– Обґрунтувати оптимальний склад будівельної суміші з урахуванням вимог технологічності та міцності.

– Проаналізувати програмне забезпечення для цифрового моделювання об'єктів і формування керуючих програм друку, здійснити їх порівняльну оцінку та розглянути сучасну світову практику застосування.

– Узагальнити взаємозв'язок матеріальних, технологічних і цифрових складових підготовчого етапу будівництва із застосуванням адитивних технологій.

**Виклад матеріалу.** Важливим етапом кожного будівельного процесу та будівництва взагалі є підготовчий етап. У загальному сенсі підготовчий етап будівництва – це сукупність організаційних, технічних та проектних заходів, спрямованих на створення необхідних умов для виконання будівельних робіт. Так в традиційному будівництві підготовчий етап охоплює наступні процеси: вибір та аналіз будівельного майданчику; проектування об'єкту будівництва; вибір будівельних матеріалів і технологій; створення умов для початку будівництва, що полягає у забезпеченні організаційної, технічної та документальної готовності, необхідної для переходу до виконання основних будівельних робіт. Дані види робіт визначені та регламентуються відповідною нормативно-технічною документацією.

На сучасному етапі розвитку будівельної галузі важливу роль відіграють технології інформаційного моделювання та інноваційні методи будівництва. Одним із перспективних напрямів у цій сфері є застосування технології 3D-друку в будівництві. Технологія 3D-друку являє собою процес формування суцільних тривимірних об'єктів практично довільної геометричної конфігурації на основі цифрової моделі. В даний час найбільш поширеним методом 3D-друку бетону є пошарове нанесення ниток пластичного матеріалу, що деформується, методом екструзії. [7]. Екструзія являє собою процес, за якого матеріал продавлюється через сопло та укладається у задану позицію відповідно до траєкторії переміщення друкувальної головки в просторі. Даний метод був уперше запропонований доктором Борохом Хошневісом у 2004 році та запатентований під торговельною маркою Contour Crafting. [1]. Використання зазначеної інноваційної технології дозволяє розширити ступінь автоматизації будівельного виробництва шляхом інтеграції автоматизованих систем будівництва з технологією інформаційного моделювання. Створена цифрова модель об'єкту може безпосередньо передаватися на друкуючий апарат за допомогою спеціальної

системи команд G-code, визначаючи параметри його роботи для відтворення змодельованого об'єкта в натуральну величину.

Проте відносна новизна та інноваційний характер цієї технології, а також підвищення рівня автоматизації, зумовлюють необхідність виконання додаткових кроків на етапі підготовки до будівництва. Зокрема, поряд із підготовчими процесами, характерними для традиційних методів будівництва, при адитивному виробництві будівельних об'єктів особливої уваги потребують підбір і дослідження матеріалів, а також моделювання об'єктів з урахуванням особливостей даної технології і налаштування параметрів процесу друку. Слід зазначити, що дані процеси взаємопов'язані і можуть впливати один на одного.

Однією з визначальних характеристик сумішей для будівельного 3D-друку є їх удобоукладальність. У технології адитивного виготовлення вона визначається здатністю матеріалу забезпечувати безперебійну подачу та прокачування через екструзійну систему і сопло друкуючої головки з одночасним швидким набором початкової структурної стійкості після нанесення. Консистенція суміші має бути підібрана таким чином, щоб забезпечувалася стабільна екструзія матеріалу на робочу поверхню без закупорювання сопла та розривів потоку, а також збереження заданої геометрії шару і форми надрукованого елемента після укладання.

Підбір оптимальної удобоукладальності сумішей для будівельного 3D-друку здійснюється експериментальним шляхом. У зв'язку з відсутньою нормативною регламентацією методик випробувань саме для адитивних технологій, на практиці використовують адаптовані експериментальні підходи та випробувальні процедури, запозичені з традиційних технологій виготовлення будівельних розчинів і бетонів.

Для контролю даного параметра було використано експеримент зі струшувальним столиком, який регламентується стандартом

ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Відповідно до вимог стандарту на диск столика встановлюється форма-конус зазначених розмірів, яку заповнюють розчином із ущільненням штикуванням. Після зняття форми виконують 30 ударів-струшувань із періодичністю один удар за секунду. Після завершення випробування вимірюють діаметр розтікання розчину, який фіксують та порівнюють із нормативними значеннями. У ході підбору оптимального показника зручності укладання було проведено серію експериментальних випробувань, яка включала приготування будівельного розчину, виконання пробного друку сумішшю на будівельному 3D-принтері, а також фіксацію величини розтікання розчину на струшувальному столику.

Для приготування будівельного розчину використовували готову суху суміш, до складу якої входили портландцемент, мінеральні заповнювачі, модифікуючі добавки, фіброволокно та вода. Регулювання показника зручності укладання здійснювали шляхом зміни водоцементного співвідношення без застосування пластифікуючих добавок. Зазначений підхід було обрано з метою мінімізації кількості змінних факторів та виключення впливу хімічних добавок на процеси тужавлення і формування міцності матеріалу.

Початковий вміст води визначали відповідно до вимог випробування на струшувальному столику, згідно з якими величина розтікання розчину повинна становити 106–115 мм. Отриманий склад перевіряли на здатність до екструзії на будівельному 3D-принтері, за результатами чого було встановлено недостатню текучість суміші та незадовільну прохідність через сопло принтера, що свідчить про надмірну жорсткість консистенції розчину.

Пробний друк сумішей виконували із використанням будівельного 3D-принтера порталного типу, оснащеного шнековою системою подачі матеріалу. Друк здійснювали через сопло діаметром 25 мм при фіксованій швидкості переміщення друкувальної головки 60 мм/с, висоті шару 25 мм та висоті розміщення друкуючої

голівки над робочим полем 40 мм. Параметри друку протягом усіх експериментальних досліджень залишалися незмінними.

Подальший підбір оптимального вмісту води здійснювали шляхом поетапного його збільшення. Кожен дослідний склад

піддавали перевірці на здатність до стабільної екструзії та забезпечення формостійкості при нанесенні наступних шарів. Паралельно визначали величину розтікання розчину на струшувальному столику. Для зручності сприйняття інформацію було зведено в таблицю 1.



а



б

Рис. 1. Результати проведення експерименту зі струшувальним столиком: а – дослід № 1 – розтікання розчину 113 мм; б – дослід № 2 – розтікання розчину 185 мм

Таблиця 1

### Результати експериментального підбору водовмісту суміші для 3D-друку

№ досліду	Маса сухої суміші, кг	Вміст води, л	Величина розтікання розчину, мм	Екструзійна придатність
1	1	0,16	113	Незадовільна
2	1	0,165	120	Обмежено придана
3	1	0,175	147	Задовільна
4	1	0,185	172	Задовільна
5	1	0,19	185	Оптимальна

Отже, на підставі отриманих результатів встановлено, що дослідні зразки № 1 та 2 характеризувалися підвищеною жорсткістю та недостатньою рухливістю, що ускладнювало проходження суміші через сопло екструдера. При цьому суміш, що подавалася через сопло, мала нерівномірну структуру та укладалася переривчасто.

Екструзійна придатність зразків № 3 та 4 була покращеною: суміш подавалася більш стабільно, однак під час друку лінійних елементів спостерігалось утворення локальних розривів шару, що свідчило про необхідність подальшого коригування складу суміші.



а



б

Рис. 2. Перевірка на здатність до екструзії суміші шляхом друку на будівельному 3D принтері: а – незадовільна екструзійна придатність; б – оптимальна екструзійна придатність

Встановлено, що при вмісті води 0,19 л на 1 кг сухої суміші отриманий розчин забезпечує необхідні технологічні властивості: екструзія відбувається стабільно та безперервно, а сформовані шари зберігають геометричну стійкість.

Не менш важливим процесом підготовки до будівництва та безпосереднього зведення об'єктів є контроль міцнісних характеристик матеріалів. Застосування технології 3D-друку, яка відноситься до інноваційних методів зведення будівельних об'єктів, потребує особливої уваги до вивчення впливу технологічних параметрів на фізико-механічні властивості матеріалу. Зокрема, зміна показників удобоукладальності суміші, часу її тужавлення, а також параметрів процесу друку може суттєво впливати на кінцеву міцність матеріалу.

Таким чином, при дослідженні показника зручності укладання будівельної суміші здійснювався відбір зразків для фіксації його міцнісних властивостей.

Згідно із загальноприйнятим визначенням будівельних термінів, суміш в'язучої речовини, дрібного заповнювача (піску), води та, за необхідності, добавок називається будівельним розчином. Оскільки склад матеріалу, що використовувався для будівельного 3D-друку, відповідає зазначеному визначенню, а спеціалізована нормативна база для випробування матеріалів, що використовуються в

технології будівельного 3D-друку, перебуває на стадії формування, під час проведення досліджень застосовували положення стандарту традиційного будівництва ДСТУ Б В.2.7-239:2010.

Так керуючись положеннями даного стандарту були виготовлені 3 серії по 3 зразки-куби в кожній з розміром ребер 70,7 мм. Куби виготовляли зі складів дослідних зразків № 1, 3 та 5, що характеризувалися вмістом води 0,16 л/кг, 0,175 л/кг та 0,19 л/кг сухої суміші відповідно. У віці 28 днів зберігання регламентованого зазначеним стандартом зразки-куби були зважені, розмічені та обміряні в характерних перерізах для визначення їх об'ємної ваги та геометричних параметрів. На наступному етапі підготовлені зразки встановлювали між опорними плитами випробувального преса П-125 таким чином, щоб навантаження передавалося рівномірно по всій площі граней. Навантаження на зразки прикладали безперервно та рівномірно зі швидкістю зростання напруження 4 кН/с до моменту руйнування. Максимальне зусилля, отримане в момент руйнування зразка, фіксували для подальшого розрахунку межі міцності розчину на стиск. Отримані результати вимірів та випробувань були зведені в таблицю 2.

Таблиця 2

#### Геометричні характеристики зразків та результати випробувань на стиск

Серія	Марка зразка	Об'єм (V), мм <sup>3</sup>	Маса, г	Об'ємна вага, кг/м <sup>3</sup>	Робоча площа (S), см <sup>2</sup>	Руйнівне навантаження (P), Н
1	1 <sub>1</sub>	357 627	751	2 100	48,99	220 000
	1 <sub>2</sub>	342 792	750	2 188	47,61	146 250
	1 <sub>3</sub>	350 035	761	2 174	47,95	169 400
2	2 <sub>1</sub>	347 865	753	2 165	49,00	160 600
	2 <sub>2</sub>	352 799	756	2 143	49,69	110 600
	2 <sub>3</sub>	335 651	729	2 172	47,61	155 600
3	3 <sub>1</sub>	350 385	727	2 075	49,35	98 750
	3 <sub>2</sub>	337 977	699	2 068	47,94	108 750
	3 <sub>3</sub>	330 683	677	2 047	46,58	103 750

Міцність визначали шляхом ділення руйнівного навантаження на робочу площу

зразка-куба, яку приймали як середнє арифметичне значення площ верхньої та

нижньої основ. Зображення процесу випробувань наведено на рисунку 3,

результати обчислень зведені до таблиці 3.



а



б

Рис. 3. Процес випробування дослідних зразків: а – розташування зразка на пресі, б – зразки після випробування

Таблиця 3

**Результати визначення міцності зразків на стиск**

Серія	Марка зразка	Міцність зразка на стиск (R), МПа	Середня міцність розчину в серії, МПа
1	1 <sub>1</sub>	44,91	36,98
	1 <sub>2</sub>	30,72	
	1 <sub>3</sub>	35,33	
2	2 <sub>1</sub>	32,78	29,24
	2 <sub>2</sub>	22,26	
	2 <sub>3</sub>	32,68	
3	3 <sub>1</sub>	20,01	21,66
	3 <sub>2</sub>	22,69	
	3 <sub>3</sub>	22,27	

Аналізуючи отримані дані можна добігти закономірного висновку, що збільшення кількості води забезпечує покращення технологічних властивостей суміші, однак призводить до зниження показників міцності матеріалу.

Як було зазначено раніше, дослідження та підбір матеріалів є важливою складовою підготовки до будівельного 3D-друку та створюють передумови для стабільної реалізації технологічного процесу. Разом із цим значну роль відіграють процеси цифрового моделювання об'єктів і налаштування параметрів друку, що забезпечуються спеціалізованим програмним забезпеченням.

Взагалі пріоритетними програмними комплексами для створення об'єктів за технологією будівельного 3D-друку є

системи, що реалізують принципи об'ємного моделювання. Серед програмного забезпечення, що використовується для розроблення цифрових моделей об'єктів, можна виділити AutoCAD 3D, ArchiCAD та SketchUp. Особливої уваги потребують програмні комплекси Revit та Rhinoceros, які найбільш широко застосовуються у сфері цифрового будівництва.

Програмний комплекс Revit реалізує принципи інформаційного моделювання будівель (BIM), що дозволяє не лише формувати тривимірну модель об'єкта, а й інтегрувати в неї інформаційні параметри конструкцій, матеріалів та технологічних процесів. Це забезпечує можливість комплексного аналізу об'єкта ще на стадії проектування та підготовки до будівельного 3D-друку.

Програмний комплекс Rhinoceros орієнтований на створення складних криволінійних та параметричних форм, що дозволяє моделювати об'єкти з підвищеною геометричною складністю та розширювати архітектурні можливості технології будівельного 3D-друку.

Але при моделюванні об'єктів для будівельного 3D-друку необхідно враховувати конструктивні та технологічні особливості друкуючого обладнання, що визначають геометричні обмеження конструкції, параметри формування шарів та безперервність процесу друку.

До основних таких особливостей належать:

- геометричні параметри друкуючої головки – розмір та форма сопла, що необхідно враховувати при визначенні товщини конструктивних елементів та мінімальних габаритів деталей;
- об'єм резервуару (бункера) для суміші, який визначає можливий об'єм конструкцій, що можуть бути надруковані без зупинки процесу;
- розміри робочої зони принтера, що визначають максимальні габарити об'єкта.

Важливим етапом будівництва є належна організація будівельного процесу. На відміну від традиційного будівництва, у якому послідовність і графік виконання робіт визначаються проектною документацією, технологічними картами та календарними графіками, технологія будівельного 3D-друку потребує інтеграції зазначених даних в єдину цифрову систему з подальшою передачею їх до друкувального обладнання. Реалізація такої інтеграції забезпечується спеціалізованим програмним забезпеченням – слайсерами.

До основних функцій програм-слайсерів належать формування та оптимізація траєкторії руху друкувальної головки, встановлення швидкості її переміщення, регулювання швидкості подачі суміші, налаштування параметрів екструзії та геометрії пошарової побудови конструкції. Як було зазначено раніше, керування друкувальним обладнанням здійснюється за допомогою управляючого коду G-code. Саме

програма-слайсер формує цей код, який є цифровим алгоритмом реалізації проектною моделі та забезпечує трансформацію геометричних даних у керований виробничий процес.

У зв'язку з обмеженим поширенням адитивних технологій у будівництві ринок програмного забезпечення у сфері слайсінгу залишається недостатньо розвиненим. Провідні компанії галузі, зокрема ICON (США), COBOD International (Данія), Apis Cor (США/ОАЕ), використовують власні програмні продукти, адаптовані до їхнього обладнання та технологічних рішень. У відкритому доступі переважно представлені слайсери, розроблені для 3D-друку полімерними матеріалами, зокрема Slic3r, PrusaSlicer, Simplify3D, Cura та Orca Slicer. Під час проведення експериментальних спроб друку були використані два останні слайсери із зазначеного переліку – Cura та Orca Slicer. Вибір зумовлений їх поширеністю у практиці застосування великоформатного екструзійного обладнання а також можливістю оперативного параметричного налаштування режимів друку. Інтерфейс зазначених програм забезпечує наочну візуалізацію траєкторій руху та дозволяє швидко коригувати технологічні параметри без безпосереднього редагування керуючого коду.

Разом із тим слід зазначити, що через відмінність реологічних та фізико-механічних характеристик цементних композицій від полімерних матеріалів використання зазначених програм у будівельному адитивному виробництві можливе лише після адаптації параметрів екструзії та стратегій формування траєкторій друку з урахуванням специфіки бетонних сумішей.

## Висновки

У ході виконання роботи було реалізовано комплекс заходів підготовчого етапу будівництва з адаптацією до інноваційної технології будівельного 3D-друку. Досліджено основні характеристики сумішей, що застосовуються

в адитивному будівництві, зокрема показники удобоукладальності та міцності, а також встановлено їх взаємозалежність. Крім того, проаналізовано програмне забезпечення, що використовується для цифрового моделювання та підготовки керуючих програм, і оцінено можливість його адаптації до потреб будівельного 3D-друку.

У процесі дослідження удобоукладальності встановлено, що при використанні традиційних методів оцінювання та граничних параметрів, визначених нормативними підходами, екструзійна придатність суміші є недостатньою. Зокрема, при замішуванні 1 кг сухої суміші з додаванням 0,16 л води зафіксовано недостатню текучість та незадовільну прохідність матеріалу через сопло принтера, що свідчить про надмірну жорсткість консистенції. Експериментальним шляхом встановлено, що для забезпечення оптимальної удобоукладальності співвідношення води до сухої суміші має становити 0,19 л на 1 кг.

Для складів із вмістом води 0,16; 0,175 та 0,19 л/кг проведено випробування на стиск шляхом руйнування зразків-кубів на лабораторному пресі П-125. За результатами випробувань отримано значення межі міцності на стиск 36,98 МПа; 29,24 МПа та 21,66 МПа відповідно. Встановлено, що збільшення водовмісту позитивно впливає на технологічні характеристики суміші (екструзійність, формування шару), проте супроводжується зниженням показників міцності матеріалу, що підтверджує наявність компромісу між технологічністю

та конструкційною надійністю.

Окрему увагу в роботі приділено цифровому моделюванню об'єктів та підготовці їх до реалізації методом будівельного 3D-друку. Проаналізовано основні програмні комплекси, що застосовуються для створення цифрових моделей, а також програмне забезпечення для формування керуючих програм друку. Встановлено, що процес моделювання не може здійснюватися ізольовано від технологічних можливостей обладнання. Під час формування геометрії об'єкта та налаштування параметрів друку необхідно враховувати конструктивні особливості принтера. Узгодження цифрової моделі з технічними параметрами обладнання є необхідною умовою забезпечення стабільності процесу друку, геометричної точності конструкції та технологічної надійності її виготовлення.

Таким чином, підготовка до початку будівництва із застосуванням технології будівельного 3D-друку є комплексним багатофакторним процесом. Вона потребує узгодження підбору та підготовки матеріалів із цифровими процесами моделювання та слайсінгу. Проведене дослідження показало, що матеріальні властивості суміші, параметри програмного забезпечення та технічні можливості обладнання повинні розглядатися у взаємозв'язку. Подальший розвиток технології доцільно пов'язувати з уніфікацією параметрів обладнання та складів сумішей, що сприятиме підвищенню стабільності та передбачуваності результатів друку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Степасюк Ю. І., Марчук В. В. Ефективні будівельні розчини для 3D-принтерів. *Будівельні матеріали та вироб.* 2019. № 101. С. 16–21. DOI: 10.48076/2413-9890.2020-101-03.
2. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Зятюк Ю. Ю. Цементно-шлакові суміші для 3D принтеру. *Будівельні матеріали та вироб.* 2021. № 102. С. 14–19. DOI: 10.48076/2413-9890.2021-102-02.
3. ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 22 с.
4. ДСТУ Б В.2.7-239:2010. Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 38 с.
5. Савицький М. В., Конопляник О. Ю., Мислицька А. О., Лясота О. В. Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3D-друку будівельних конструкцій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* 2020. № 2 (263–264). С. 59–68. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.64.622.

6. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D-printing using concrete extrusion : a roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
7. Kloft H., Empelmann M., Hack N., Herrmann E., Lowke D. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing. *Civil Engineering Design*. 2020. Vol. 2. Pp. 131–139. DOI: 10.1002/cend.202000022.
8. Konoplianyk O., Sopilnyak A., Sirenok K., Sereda S., Yarova T. Constituent components of 3D printing in construction : mixture, reinforcement and their main characteristics. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 534. P. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202453401009.
9. Le T. T., Austin S. A., Lim S., Buswell R. A., Law R., Gibb A. G. F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012. Vol. 45 (8). Pp. 1–12. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
10. Wangler T., Roussel N., Bos F. P., Salet T. A. M., Flatt R. J. Digital concrete : a review. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 123. P. 105780. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105780.

## REFERENCES

1. Dvorkin L.Y., Zhitkovskiy V.V., Stepasiuk Y.I. and Marchuk V.V. *Efektivni budivelni rozchyny dlia 3D- prynteriv* [Effective construction mortars for 3D-printers]. *Budivelni materialy ta vyroby* [Building Materials and Products]. 2019, no. 101, pp. 16–21. DOI: 10.48076/2413-9890.2020-101-03. (in Ukrainian).
2. Dvorkin L.Y., Marchuk V.V. and Ziatyuk Y.Y. *Tsementno-shlakovi sumishi dlia 3D prynteru* [Cement-slag mixtures for 3D-printer]. *Budivelni materialy ta vyroby* [Building Materials and Products]. 2021, no. 102, pp. 14–19. DOI: 10.48076/2413-9890.2021-102-02. (in Ukrainian).
3. DSTU B V.2.7-187:2009. *Budivelni materialy. Tsementy. Metody vyznachennia mitsnosti na zghyn i stysk* [Building materials. Cements. Methods for determination of flexural and compressive strength]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2009, 22 p. (in Ukrainian).
4. DSTU B V.2.7-239:2010. *Budivelni materialy. Rozchyny budivelni. Metody vyprobuvan* [Building materials. Construction mortars. Test methods]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2010. 38 p. (in Ukrainian).
5. Savytskyi M.V., Konoplianyk O.Y., Myslytska A.O. and Liasota O.V. *Vyznachennia fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk betoniv dlia 3D-druku budivelnykh konstruksii* [Determination of physical and mechanical characteristics of concretes for 3D printing of building structures]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 2 (263–264), pp. 59–68. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.64.622. (in Ukrainian).
6. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z. and Dirrenberger J. 3D-printing using concrete extrusion : a roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018, vol. 112, pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
7. Kloft H., Empelmann M., Hack N., Herrmann E. and Lowke D. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing. *Civil Engineering Design*. 2020, vol. 2, pp. 131–139. DOI: 10.1002/cend.202000022.
8. Konoplianyk O., Sopilnyak A., Sirenok K., Sereda S. and Yarova T. Constituent components of 3D-printing in construction : mixture, reinforcement and their main characteristics. *E3S Web of Conferences*. 2024, vol. 534, p. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202453401009.
9. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. and Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012, vol. 45 (8), pp. 1–12. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
10. Wangler T., Roussel N., Bos F.P., Salet T.A.M. and Flatt R.J. Digital concrete : a review. *Cement and Concrete Research*. 2019, vol. 123, p. 105780. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105780.

Надійшла до редакції: 18.02.2026.

Прийнято після рецензування: 01.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.

Відповідальність за достовірність інформації, що міститься в друкованих матеріалах,  
несуть автори.

Редколегія не завжди поділяє авторську точку зору.

Комп'ютерну верстку виконано в редакційно-видавничому відділі  
Українського державного університету науки і технологій, ННІ «ПДАБА»

Адреса редакції:

✉ вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Україна, м. Дніпро  
кімната 501 (відповідальний секретар)

☎ +38 (050) 452-43-63

e-mail: [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com)

Підписано до друку 28.05.2026 р. Формат 60×84 1/8.

Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 10,88. Умовн. фарб.-відб. арк. 10,88.

Обл.-видавн. арк. 21,76. Наклад 50 прим. Зам. 218

---

---

Authors are responsible for the accuracy of the information  
contained in the printed materials.

Editors do not always agree with the author's point of view.

Desktop publishing is performed in the Editorial Department of  
Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "PSACEA".

Editorial address:

✉ room 501 (Executive Secretary)

24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine

☎ +38 (050) 452-43-63

e-mail: [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com)

Sent to press on 28 May 2026. Format 60×84 1/8.

Digital printing. Conventional quire 10,88. Conventional colour imprints 10,88.

Publisher's signatures 21,76. Number of copies 50. Order 218