

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

**УКРАЇНСЬКИЙ
ЖУРНАЛ
БУДІВНИЦТВА ТА
АРХІТЕКТУРИ**

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 2 (032)
Березень – Квітень 2026

Дніпро 2026

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

А. С. Беліков, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. М. М. Біляєв, д-р техн. наук, Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), Дніпро. В. І. Большаков, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. В. Є. Волкова, д-р техн. наук, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро. В. М. Волчук, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. С. І. Губенко, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. Ю. О. Кірічек, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. Т. С. Кравчуновська, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. Ю. І. Криворучко, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. О. О. Лапшин, д-р техн. наук, Криворізький національний університет, Кривий Ріг. В. П. Мироненко, д-р арх., Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків. М. М. Налісько, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. Т. Д. Нікіфорова, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. В. І. Проскураков, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. В. Л. Сєдін, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. В. В. Товбич, д-р арх., Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ. О. В. Харлан, к-т арх., ННІ ПДАБА, Дніпро. Едіт Барна, к-т техн. наук, Будапештський технічно-економічний університет, Будапешт (Угорщина). Анна Бач, д-р арх., Вроцлавський університет, Вроцлав (Польща). Александрс Корякінс, д-р техн. наук, Ризький технічний університет, Рига (Латвія). В. І. Куксенко, к-т техн. наук, Управління з атомної енергетики Великобританії, Оксфорд (Великобританія). Богуслав Подхалянський, д-р арх., Краківський політехнічний інститут імені Тадеуша Костюшка, Краків (Польща).

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 № 8 від 29.04.2026.

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

Наукометричні бази та електронні бібліотеки, в яких зареєстрований науково-практичний журнал

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 МОЇСЕНКО
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

№ 2 (032)
March – April 2026

Dnipro 2026

EDITORIAL STAFF :

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

MEMBERS OF EDITORIAL STAFF :

A.S. Belikov, Doctor of Engineering Science, *ESI "Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture" (ESI PSACEA), Dnipro*. M.M. Biliaiev, Doctor of Engineering Science, *Ukrainian State University of Science and Technologies (USUST), Dnipro*. V.I. Bolshakov, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. V.Yev. Volkova, Doctor of Engineering Science, *Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro*. V.M. Volchuk, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. S.I. Gubenko, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. Yu.O. Kirichuk, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. T.S. Kravchunovska, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. Yu.I. Kryvoruchko, Doctor of Architecture, *National University "Lviv Polytechnic", Lviv*. O.O. Lapshyn, Doctor of Engineering Science, *Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih*. V.P. Myronenko, Doctor of Architecture, *O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv*. M.M. Nalysko, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. T.D. Nikiforova, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. V.I. Proskuriakov, Doctor of Architecture, *National University "Lviv Polytechnic", Lviv*. V.L. Siedin, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. V.V. Tovbych, Doctor of Architecture, *Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv*. O.V. Kharlan, Candidate of Architecture, *ESI PSACEA, Dnipro*. Edit Barna, PhD, *Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary*. Anna Bać, Doctor of Architecture, *Wroclaw University of Science and Technology, Wroclaw, Poland*. Aleksandrs Korjakins, Doctor of Engineering Science, *Riga Technical University, Riga, Latvia*. V. I. Kuksenko, PhD, Candidate of Engineering Science, *UK Atomic Energy Authority, Oxford, UK*. Boguslaw Podhalyanski, Doctor of Architecture, *Cracow University of Technology, Cracow (Poland)*.

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 IIP – issued by the Ministry of Justice of Ukraine dated October 09, 2020.

Founder & Publisher State Higher Education Institution "Prydniprovskya 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. 8 from 29.04.2026

Journal website <https://uajcea.pgasa.dp.ua>

Placement of the scientific-practical journal in the international scientometric databases and e-libraries 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, Vernadsky National Library of Ukraine.

ISSN 2710-0367 (Print)
2710-0375 (Online)
Art & Technical Editor Serhii MOISEIENKO
Editor & Proofreader Olena TYMOSHENKO

У ЦЬОМУ НОМЕРІ

Бегічев С. В., Ішутіна Г. С., Чумак Л.О. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ м. ДНІПРО ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЧИСЕЛЬНОГО ІМІТАЦІЙНОГО СТАТИСТИЧНОГО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО.....	7
Беліков А. С., Тодоров О. П., Корогаєв В. М., Харченко В. В., Клименко Г. О. РОЗРОБКА ЗАХИСНОГО СКЛАДУ ТА СПОСОБУ ЙОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ДЕРЕВ'ЯНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЮ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР.....	17
Волчок Д. Л., Кожемякіна І. Ф., Заварикін С. Л., Сахарчук С. В. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ. СУЧАСНІ ПІДХОДИ. СЕЙСМІКА ТА ВИБУХ (огляд).....	24
Воробйов В. В., Шило О. С. НА ПОЧАТКУ БУВ КУБ САТУРНА (МАЛО ВІДОМИЙ КОНТЕНТ АРХІТЕКТУРИ).....	34
Косенко Л. В. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ УТЕПЛЕННЯ У КОНТЕКСТІ СТАНДАРТУ NZEB ТА ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ.....	52
Косьор Л., Калда Г., Петруха-Урбанік К., Рибалка К., Соколан Ю. АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ КРАКОВА ЯК ФАКТОР ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТА.....	60
Кравчуновська Т. С., Кудрейко Є. Д. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ БУДІВНИЦТВА АВТОМАТИЗОВАНИХ ПАРКУВАЛЬНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ЦІЛЬНОЇ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ.....	71
Нестерова О. В., Нагорна О. К., Нечитайло М. П., Шарков В. В., Нестеров Я. С. ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТА НАНОСТРУКТУРОВАНИХ КОАГУЛЯНТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОСВІТЛЕННЯ МАЛОМУТНИХ КОЛЬОРОВИХ ВОД.....	78
Савош Г. П. КОНЦЕПТУАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ СУЧАСНОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ.....	89
Сєдін В. Л., Ульянов В. Ю., Ковба В. В., Загільський В. А., Бекіров В. О., Лапко Р. В. ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ПАСИВНИХ СИСТЕМ ПОЖЕЖОГАСІННЯ НА МАЙДАНЧИКАХ АЕС.....	103
Фісуненко П. А., Сопільняк А. М., Бородін М. О. КОНЦЕПЦІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ В УПРАВЛІННІ ДЕВЕЛОПЕРСЬКИМИ ПРОЄКТАМИ : ТЕОРЕТИЧНІ ПАРАДИГМИ.....	110
Харченко К. С., Полюшкін С. С., Янковська Л. Є., Краснюк А. В., Щедрова Т. Г. СТАНОВЛЕННЯ І РОЗВИТОК ВІЗУАЛЬНИХ КОМУНІКАЦІЙ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА.....	117
Чумак Л. О. ОСВІТНІ ВТРАТИ У МАТЕМАТИЧНІЙ ПІДГОТОВЦІ СТУДЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ.....	125
Шинкевич О. І., Смолін Д. О. ЕФЕКТИВНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ФОСФОГІПСУ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ.....	135
Прокоф'єва К. А., Решетілова О. М. МОРФОЛОГІЯ КНИГИ : ЕВОЛЮЦІЯ КОДЕКСУ В ІНФОРМАЦІЙНОМУ СУСПІЛЬСТВІ.....	143
Данішевський В. В., Безверхий Д. С. ОГЛЯД НЕОДНОРІДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТАМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОГО І СЕЙСМІЧНОГО ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	151
Кучин І. О. ДВОВИМІРНІ ҐРУНТОВІ МЕТАСТРУКТУРИ ТА ПЕРІОДИЧНІ ФУНДАМЕНТИ ДЛЯ ВІБРОСЕЙСМІЧНОГО ЗАХИСТУ : ОГЛЯД.....	160

CONTENT

Biehichev S.V., Ishutina H.S., Chumak L.O. RELIABILITY ASSESSMENT OF THE GEODETIC NETWORK OF DNIPRO USING THE MONTE CARLO NUMERICAL SIMULATION METHOD.....	7
Bielikov A.S., Todorov O.P., Korotaiev V.M., Harchenko V.V., Klymenko G.O. DEVELOPMENT OF A PROTECTIVE COMPOSITION AND METHOD OF ITS PRODUCTION FOR PROTECTION OF WOODEN MATERIALS AND STRUCTURES UNDER THE EXPOSURE OF HIGH TEMPERATURES.....	17
Volchok D.L., Kozhemiakina I.F., Zavarykin S.L., Sakharchuk S.V. DEVELOPMENT OF THE THEORY OF STRUCTURAL ELEMENT ANALYSIS UNDER DYNAMIC LOADS IN THE PRESENCE OF UNCERTAINTIES. CONTEMPORARY APPROACHES. SEISMIC AND BLAST LOADS (overview).....	24
Vorobiov V.V., Shylo O.S. IN THE BEGINNING, THERE WAS A SATURN CUBE (LITTLE KNOWN ARCHITECTURE CONTENT).....	34
Kosenko L.V. ASSESSMENT OF INSULATION EFFICIENCY IN THE CONTEXT OF THE NZEB STANDARD AND THE USE OF SOLAR POWER PLANTS FOR RESIDENTIAL BUILDINGS.....	52
Kosior L., Kalda G., Pietrucha-Urbanik K., Rybalka K., Sokolan Yu. ANALYSIS OF AIR POLLUTION IN KRAKOV AS A FACTOR OF THE CITY'S ECOLOGICAL SAFETY.....	60
Kravchunovska T.S., Kudreiko Ye.D. SUBSTANTIATION OF THE EXPEDIENCY OF THE CONSTRUCTION OF AUTOMATED PARKING SYSTEMS IN DENSE URBAN AREAS.....	71
Nesterova O.V., Nahorna O.K., Nechytailo M.P., Sharkov V.V., Nesterov Ya.S. USE OF POLYMERIC AND NANOSTRUCTURED COAGULANTS FOR IMPROVING THE CLARIFICATION EFFICIENCY OF LOW-TURBIDITY COLORED WATERS.....	78
Savosh G.P. CONCEPTUAL OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF MODERN EDUCATION IN UKRAINE.....	89
Sedin V.L., Ulyanov V.Yu., Kovba V.V., Zahilskyi V.A., Bekirov V.O., Lapko R.V. ON THE NEED TO IMPLEMENT PASSIVE FIRE SUPPRESSION SYSTEMS AT NUCLEAR POWER PLANT SITES.....	103
Fisunenka P.A., Sopilniak A.M., Borodin M.O. CONCEPT OF IMPLEMENTING BIM-TECHNOLOGIES IN DEVELOPMENT PROJECT MANAGEMENT: THEORETICAL PARADIGMS.....	110
Kharchenko K.S., Poliushkin S.S., Yankovska L.Ye., Krasnyuk A.V., Shchedrova T.G. FORMATION AND DEVELOPMENT OF VISUAL COMMUNICATIONS OF THE URBAN ENVIRONMENT.....	117
Chumak L.O. EDUCATIONAL LOSSES IN MATHEMATICAL TRAINING OF STUDENTS IN TECHNICAL DISCIPLINES.....	125
Shynkevych O.I., Smolin D.O. EFFECTIVE USE OF PHOSPHOGYPSUM IN THE CONSTRUCTION OF MOTORWAYS.....	135
Prokofieva K.A., Reshetilova O.M. MORPHOLOGY OF THE BOOK: EVOLUTION OF THE CODEX IN THE INFORMATION SOCIETY.....	143
Danishevskyy V.V., Bezverkhyy D.S. REVIEW OF HETEROGENEOUS STRUCTURES AND METAMATERIALS FOR VIBRATION AND SEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES.....	151
Kuchyn I.O. TWO-DIMENSIONAL SOIL METASTRUCTURES AND PERIODIC FOUNDATIONS FOR VIBRO-SEISMIC PROTECTION : A REVIEW.....	160

УДК 528.04:519.237

DOI: 10.30838/UJCEA.2313.290426.7.1221

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ м. ДНІПРО ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЧИСЕЛЬНОГО ІМІТАЦІЙНОГО СТАТИСТИЧНОГО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

БЕГІЧЕВ С. В.¹, канд. техн. наук, доц.,
ШУТИНА Г. С.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
ЧУМАК Л. О.³, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, 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) 965-93-71, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, 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) 518-42-54, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Кафедра фізики та прикладної математики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 328-19-35, e-mail: larisa4umak@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

Анотація. Геодезична мережа є фундаментальною основою для виконання топографо-геодезичних робіт, забезпечення будівництва, інженерних вишукувань, картографування та ведення земельного кадастру. Надійна, точна та стабільна мережа забезпечує достовірність і безпеку геопросторових даних. У містах з інтенсивною господарською діяльністю, таких як м. Дніпро, геодезичні пункти зазнають значного впливу, що може призводити до їх зміщення, втрати стабільності та зниження надійності геодезичної мережі (ГМ). Традиційні методи оцінки стану мережі базуються на періодичних вимірюваннях положень пунктів і аналізі їх зміщень, що є трудомістким та часовитратним процесом. Застосування методу Монте-Карло дозволяє моделювати численні сценарії можливих зміщень геодезичних пунктів і оцінювати надійність мережі з високою точністю, враховуючи як випадкові, так і систематичні похибки вимірювань. Це значно скорочує час та зусилля на обробку даних, дає змогу прогнозувати потенційні проблеми мережі та планувати пріоритетні заходи для її підтримки та оновлення. **Мета роботи** – оцінити надійність ГМ м. Дніпро з використанням методу Монте-Карло для моделювання

можливих зміщень геодезичних пунктів. Виконати аналіз нормативно-правових документів із обстеження геодезичних мереж, закордонних та вітчизняних літературних джерел із застосування методу Монте-Карло в геодезії. **Методика.** Використання методу Монте-Карло для моделювання численних сценаріїв

можливих зміщень геодезичних пунктів. Врахування випадкових та систематичних похибок вимірювань для більш реалістичної оцінки надійності мережі. Порівняння результатів чисельного моделювання з даними періодичних вимірювань традиційними методами для верифікації та оцінки ефективності підходу. Аналіз результатів для прогнозування потенційних деформацій та планування заходів щодо підтримки та оновлення мережі.

Наукова

новизна. Вперше застосовано метод Монте-Карло для комплексного моделювання можливих зміщень

геодезичних пунктів у міських умовах з високим навантаженням. Визначено вплив випадкових і систематичних похибок вимірювань на надійність геодезичної мережі. Проведено порівняння традиційного підходу оцінки стану мережі з чисельним імітаційним методом, що дозволяє підвищити точність та ефективність оцінки.

Практична

значимість. Виконана оцінка надійності геодезичної мережі м. Дніпро з використанням методу Монте-Карло.

У

результаті кожної ітерації у загальній кількості 5 100 згенеровано зміщення пунктів мережі та визначено ймовірність безвідмовної роботи ГМ. **Результати.** Чисельний імітаційний статистичний метод Монте-Карло

ґрунтується на стохастичному моделюванні випадкових величин і полягає у багаторазовому виконанні чисельних симуляцій (5 100 ітерацій) із використанням випадкових чисел, що відповідають середньоквадратичним похибкам положення геодезичних пунктів, для моделювання поведінки системи – геодезичної мережі. Застосування цього методу дало змогу отримати ймовірнісні значення середньоквадратичних похибок для кожного з 31 пункту Державної опорної геодезичної мережі м. Дніпро різної категорії точності. У кожній ітерації було визначено ймовірність безвідмовної роботи геодезичної мережі м. Дніпро, яка за результатами моделювання у середньому становить 82,5 %, що задовольняє очікуваному рівню надійності ($P \geq 80\%$), но є критичним.

Ключові слова: метод Монте-Карло; геодезична мережа; оцінка надійності; середня квадратична похибка положення пункту; ймовірність безвідмовної роботи; геодезичний моніторинг

RELIABILITY ASSESSMENT OF THE GEODETIC NETWORK OF DNIPRO USING THE MONTE CARLO NUMERICAL SIMULATION METHOD

BIHICHEV S.V.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ISHUTINA H.S.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
CHUMAK L.O.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Highways, Geodesy and Land 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 (050) 965-93-71, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Department of Highways, Geodesy and Land 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 (097) 518-42-54, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Department of Physics and Applied Mathematics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Dnipro Institute of Infrastructure and Transport", 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (095) 328-19-35, e-mail: larisa4umak@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

Abstract. The geodetic network is a fundamental basis for conducting topographic and geodetic works, construction, engineering surveys, mapping, and land cadastre management. A reliable, accurate, and stable network ensures the credibility and security of geospatial data. In cities with intensive economic activity, such as Dnipro, geodetic points are subjected to significant loads, which may lead to deformations, loss of stability, and reduced reliability of the geodetic network. Traditional methods for assessing the condition of the network are based on periodic measurements of point positions and the analysis of their displacements, which is a labor-intensive and time-consuming process. The application of the Monte Carlo method allows for the simulation of numerous possible scenarios of geodetic point displacements and the assessment of network reliability with high accuracy, taking into account both random and systematic measurement errors. This significantly reduces the time and effort required for data processing, enables the prediction of potential network issues, and supports the planning of priority measures for its maintenance and updating. **The purpose of the work** is to assess the reliability of the geodetic network of Dnipro using the Monte Carlo method to model possible displacements of geodetic points. The study includes an analysis of regulatory and legal documents on surveying geodetic networks, as well as foreign and domestic literature sources on the application of the Monte Carlo method in geodesy. **Methodology.** Application of the Monte Carlo method to model numerous scenarios of possible displacements of geodetic points. Consideration of random and systematic measurement errors for a more realistic assessment of network reliability. Comparison of numerical simulation results with data from periodic measurements using traditional methods to verify and evaluate the effectiveness of the approach. Analysis of results to predict potential deformations and plan measures for network maintenance and updating. **Scientific novelty.** For the first time, the Monte Carlo method has been applied for comprehensive modeling of possible displacements of geodetic points in urban conditions with high loads. The influence of random and systematic measurement errors on the reliability of the geodetic network has been determined. A comparison has been made between the traditional approach to assessing the network condition and the numerical simulation method, which allows improving the accuracy and efficiency of the assessment. **Practical value.** The reliability of the geodetic network of Dnipro was assessed using the Monte Carlo method. In each of the 5 100 iterations, displacements of network points were generated, and the probability of failure-free operation of the geodetic network was determined. **Results.** The numerical simulation statistical Monte Carlo method is based on stochastic modeling of random variables and consists in repeatedly performing numerical simulations (5 100 iterations) using random numbers corresponding to the root mean square errors of geodetic point positions to model the behavior of the system – the geodetic network. The application of this method made it possible to obtain probabilistic values of root mean square errors for each of the 31 points of the State Geodetic Network. In each iteration, the probability of failure-free operation of the geodetic network of the city of Dnipro was determined, which, according to the simulation results, averaged 82,5 %, satisfying the expected reliability level ($R \geq 80$ %).

Keywords: *Monte Carlo method; geodetic network; reliability assessment; root mean square error of point position; probability of failure-free operation або reliability probability; geodetic monitoring*

Постановка проблеми. Актуальність дослідження надійності геодезичних мереж (ГМ) зумовлена зростанням вимог до точності та стабільності геодезичних побудов у сучасних умовах розвитку

містобудування, інженерної інфраструктури та геоінформаційних систем. Геодезичні мережі є просторовою основою для виконання топографо-геодезичних, маркшейдерських і кадастрових робіт, тому

їх надійність безпосередньо впливає на якість проєктування, будівництва та експлуатації об'єктів. Крім того, вплив техногенних і природних факторів, таких як деформації земної поверхні, зсувні процеси, сейсмічні явища та антропогенне навантаження, може призводити до порушення геометричної стабільності геодезичних пунктів. У зв'язку з цим виникає потреба в удосконаленні методів оцінювання надійності ГМ, зокрема із застосуванням сучасних чисельних і статистичних методів аналізу.

Проведення моніторингу пунктів геодезичних мереж є важливим показником забезпечення просторової стабільності та достовірності геодезичної основи держави. Регулярний контроль збереженості та положення пунктів ГМ дає змогу своєчасно виявляти їх пошкодження, зсуви або втрату внаслідок впливу природних і техногенних чинників, в тому числі внаслідок вандалізму.

На сучасному етапі моніторинг пунктів ГМ здійснюється із застосуванням супутникових GNSS-технологій, геоінформаційних систем і періодичних польових обстежень. Водночас у багатьох регіонах спостерігається недостатня регулярність оновлення даних, яке пов'язано з обмеженим фінансуванням та відсутністю єдиної державної автоматизованої системи контролю та обліку, що знижує стан геодезичних мереж.

У зв'язку з цим актуальним є вдосконалення методів моніторингу стану геодезичних мереж, впровадження науково обґрунтованої періодичності спостережень і сучасних статистичних підходів до аналізу результатів вимірювань.

Виділення невирішеної проблеми. Державна геодезична мережа (ДГМ) включає:

- геодезичну (планову) мережу, що включає УПМ ГНСС 1, 2, 3 класів;
- нівелірну (висотну) мережу, що включає мережі I, II, III та VI класів;
- гравіметричну мережу, що складається з фундаментальної мережі та мережі I класу;

- геодезичних мереж спеціального призначення.

Планова ДГМ забезпечує впровадження на всій території країни єдиної державної системи координат УСК-2000. Ось чому важливим є періодичний моніторинг (обстеження) пунктів державної геодезичної мережі та її оновлення у разі необхідності.

Відповідно до вимог Порядку [1] обстеження пунктів ДГМ полягає у встановленні їх місцезнаходження та перевірці стану основних конструктивних елементів. Згідно з Порядком [2] геодезичний моніторинг пунктів ДГМ здійснюється Держгеокадастром шляхом організації регулярних і періодичних перевірок їхнього технічного стану й охоплює контроль стану та стійкості її геодезичних пунктів, а також проведення спостережень за горизонтальними і вертикальними деформаціями земної поверхні та змінами значень прискорення вільного падіння в межах території держави.

Систематичне обстеження та актуалізація геодезичних пунктів ДГМ виконуються суб'єктами геодезичних робіт на відповідних територіях у процесі здійснення топографо-геодезичних робіт, земельно-кадастрових зйомок та інженерно-геодезичних вишукувань, що передбачають використання геодезичних пунктів, як вихідних.

Періодичний моніторинг за Порядком [2] здійснюється за необхідності, але не рідше одного разу на десять років, а в межах міст і територій з інтенсивною господарською діяльністю – щонайменше один раз на п'ять років.

За даними досліджень [3] складені таблиці 1 та 2 обстежень планової ДГМ України.

Аналіз результатів розподілу середніх квадратичних помилок (СКП) в геодезичній (плановій) мережі України показав, що із загальної кількості пунктів ДГМ (24 659 пунктів) найбільша їх кількість із СКП що знаходяться у межах від 2 до 3 см (34,1 %), а також від 3 до 4 см (25,2 %), найменша кількість пунктів із СКП, що знаходяться у

межах від 6 до 10 см (0,9 %), а також перевищують 10 см.

Таблиця 1

Геодезична (планова) мережа України [3]

Назви характеристик планової ДГМ	1 клас	2 клас	3 клас	Всього
Кількість пунктів	815	5679	18676	25198
Мінімальне відхилення	0,001	0,001	0,001	0,001
Максимальне відхилення	0,026	0,112	0,143	0,143
Середнє відхилення	0,003	0,020	0,032	0,028
Середнє квадратичне відхилення	0,002	0,007	0,013	0,012

Таблиця 2

Розподіл СКП у плановій ДГМ [3]

СКП	1 клас	2 клас	3 клас	Всього	%
0 – 1 см	805	316	848	1 969	8
1 – 2 см	8	2 738	1 280	4 026	16,3
2 – 3 см	2	2 219	6 193	8 414	34,1
3 – 4 см	0	189	6 026	6 215	25,2
4 – 5 см	0	80	2 978	3 058	12,4
5 – 6 см	0	30	729	759	3,1
6 – 10 см	0	13	202	215	0,9
Більше 10 см	0	1	2	3	0

У Додатках 1 та 2 Порядку [2] наведені основні вимоги до побудови геодезичної мережі 2 та 3 класу, що наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння вимог до побудови планових ДГМ 2 та 3 класу

Параметри мережі	2 клас	3 клас
СКП визначення положення пунктів, м	0,04–0,05	0,05
СКП вимірювання кутів, "	1	+1,5
СКП вимірювання сторони, м	0,04	0,05
Максимально допустима відносна похибка вимірювання сторони, ms/s	1:300 000	1:200 000

У Порядку [4] сказано, що СКП визначення координат пунктів ГМ спеціального призначення у межах

населених пунктів та промислових об'єктів не повинні перевищувати 0,05 м.

Якщо на основі даних таблиць 2 та 3 обрати стабільні пункти ДГМ, то їх загальна кількість складе:

- 1 клас – 815 пунктів;
- 2 клас – 5 462 пунктів;
- 3 клас – 17 325 пунктів.

Всього – 23 680 стабільних пунктів.

Розрахуємо надійність планової ДГМ України, ймовірність її безвідмовної роботи:

$$P = \frac{23680}{24659} \cdot 100 \% = 95,7 \%$$

За умови $P \geq 90 \%$ можна зробити висновок, що планова ДГМ України знаходиться у надійному стані.

Щодо стану загальнодержавної геодезичної мережі, стан регіональних мереж може відрізнитися і тому актуальним питанням є, особливо для регіонів з інтенсивною інженерною діяльністю, виконувати своєчасну оцінку надійності їх пунктів. Тому розглянемо та проаналізуємо стан ГМ м. Дніпро за результатами геодезичного моніторингу та стохастичного моделювання відмов методом Монте-Карло.

За умови $P \geq 90 \%$ можна зробити висновок, що планова ДГМ України знаходиться у надійному стані.

Стан регіональних геодезичних мереж, особливо для регіонів з інтенсивною інженерною діяльністю, може відрізнитися від загальнонаціональних мереж, у зв'язку з чим актуальним є виконання своєчасної оцінки надійності їх пунктів. Тому доцільно розглянути та проаналізувати стан ГМ м. Дніпро за результатами геодезичного моніторингу та стохастичного моделювання відмов методом Монте-Карло.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації [5] проаналізовано засади застосування методу Монте-Карло для дослідження складових похибок (як систематичних, так і випадкових) геодезичних приладів. Для оцінювання впливу окремих компонентів систематичної похибки запропоновано використання коефіцієнтів кореляції Пірсона та побудованої на їх основі кореляційної

матриці. Визначено у відсотках співвідношення основних параметрів, що враховують випадкові та систематичні похибки. Розроблено масштабовану модель, що дає змогу здійснювати аналітичну й графічну оцінку впливу складових систематичної похибки на точність вимірювань. Виконані розрахунки підтвердили доцільність і коректність застосування запропонованої масштабованої моделі для аналізу точності вимірювань геодезичними приладами.

У статті [6] автори пропонують доповнити традиційні методи врівноваження геодезичних мереж, використавши двоетапний аналіз для оцінювання невизначеності результатів. На першому етапі розглядаються початкові вимірювання та чинники, які можуть на них впливати. Для цього застосовується підхід до оцінювання невизначеності за рекомендаціями GUM «Guidelines to the Expression of Uncertainty in Measurements», що є стандартним довідником у сфері моделювання невизначеності. Другий етап полягає у використанні моделювання методом Монте-Карло. Багаторазово імітується весь процес обробки даних: починаючи від початкових вимірювань і їх попередньої обробки і до врівноваження та оцінки якості результатів.

У GUM усі джерела невизначеності поділяються на «тип А» і «тип В». Невизначеності «типу А» визначаються за допомогою класичних статистичних методів, тоді як невизначеності «типу В» пов'язані з іншими чинниками, такими як досвід роботи з приладом та аналіз його точнісних характеристик. Обидва типи невизначеностей можуть містити випадкові та систематичні складові похибок.

У дослідженні Neumann I., Alkhatib H., Kutterer H. [7] основну увагу приділено критичному порівнянню методів Монте-Карло та нечітких методів у процесі поширення різних видів невизначеностей, особливо «типу В». Якщо метод Монте-Карло розглядає всі невизначеності як випадкові, то нечіткі методи розрізняють випадкові та систематичні похибки.

Випадкові складові моделюються в стохастичній формі, а систематичні невизначеності опрацьовуються за допомогою нечітких методів. Запропонована процедура у роботі [7] описується з наведенням теоретичних положень і числового прикладу оцінювання невизначеності на прикладі застосування лазерного сканування.

Стандартне відхилення значення нелінійної функції може бути визначене за законом поширення коваріації. Існуючі методи поширення коваріації для нелінійних моделей мають низку недоліків: метод апроксимації функції потребує складних операцій диференціювання, а метод Монте-Карло характеризується великою обчислювальною затратністю та низькою швидкістю збіжності.

Для усунення цих недоліків у роботі [8] запропоновано використання методу квазі-Монте-Карло (КМК) та розроблено процедуру його реалізації для поширення коваріації як за незалежних, так і за корельованих спостережень. З урахуванням того, що метод квазі-Монте-Карло не дозволяє ефективно збалансувати кількість симуляцій і точність результатів, запропоновано новий алгоритм КМК для малої кількості пакетних симуляцій – адаптивний квазі-Монте-Карло (АКМК).

Методи КМК та алгоритм АКМК застосовано для задач прямої засічки та поширення коваріації вектора базової лінії GNSS у геодезичних вимірюваннях. Отримані у роботі [8] результати підтверджують ефективність методу КМК та алгоритму АКМК. Метод АКМК дозволяє підвищити обчислювальну ефективність майже на 84,4 %. Запропонований підхід відкриває нові можливості для поширення коваріації в нелінійних моделях.

У публікації [9] запропонований новий спосіб точного налаштування (масштабування) базисів для електронних далекомірів. Метод перевіряють і оцінюють за допомогою комп'ютерних симуляцій Монте-Карло, щоб врахувати всі можливі похибки та зробити результати більш надійними. Завдяки використаній

методології отримані параметри без помилок. Методи, описані у дослідженні [9], базуються на ітеративно зваженому методі найменших квадратів і можуть використовуватися як для оцінки параметрів, так і для виявлення викидів. Це особливо важливо для калібрування електромагнітних дальномірів за допомогою моделювання методом Монте-Карло та вимірних тестових базисів. Результати показали, що однією з переваг застосованої методики є підвищення надійності оцінених калібрувальних параметрів. Оцінка за методом найменших квадратів може бути спотворена систематичними та несистематичними помилками, що призводить до упередженості оцінених параметрів.

Визначення точності функцій від вимірних або скоригованих значень може бути проблемою у геодезичних обчисленнях. Для цього зазвичай використовують загальний закон поширення коваріації або, у випадку некорельованих спостережень, поширення дисперсії (формулу Гаусса). Такий підхід теоретично обґрунтований для лінійних функцій.

У випадку нелінійних функцій зазвичай застосовують розкладання першого порядку ряду Тейлора, проте це рішення може містити похибку через відкидання вищих порядків. Метою дослідження [10] було визначення того, наскільки можна застосовувати загальний закон поширення дисперсії для нелінійних функцій, що використовуються у базових геодезичних обчисленнях.

У статті [10] наведено помилки, що виникають через нехтування вищими порядками, і визначено межі допустимих спрощень. Основою аналізу є порівняння результатів, отриманих за законом поширення дисперсії, та ймовірнісним підходом, а саме симуляціями Монте-Карло.

Симуляції та аналіз результатів підтверджують можливість застосування загального закону поширення дисперсії у базових геодезичних обчисленнях навіть для нелінійних функцій. Єдина умова – це достатня точність спостережень, яка, як

правило, не є проблемою при використанні сучасних геодезичних приладів.

Аналіз літературних джерел показав актуальність застосування методу Монте Карло для оцінювання параметрів точності геодезичних вимірювань і відкриває напрям його використання для формування методології оцінки надійності стану геодезичних мереж.

Метою роботи є оцінка надійності геодезичної мережі м. Дніпро шляхом застосування методу Монте-Карло.

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів. У 2011 р. ДП «Науково-дослідним інститутом геодезії і картографії» було виконано:

– обстеження та відновлення 79 пунктів існуючої ДГМ, побудованої у 1954–1961 р. на території м. Дніпропетровська (рис. 1);

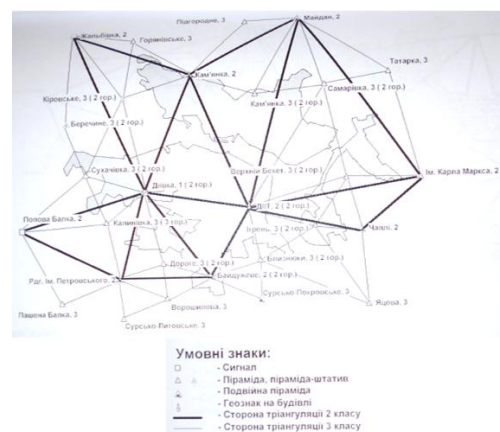


Рис. 1. Схема ДГМ в м. Дніпропетровськ (1954 р.) (з 2016 р. м. Дніпро.)

– обстеження та відновлення 3 519 пунктів існуючої міської мережі 4 класу та 1, 2 розрядів (рис. 2);

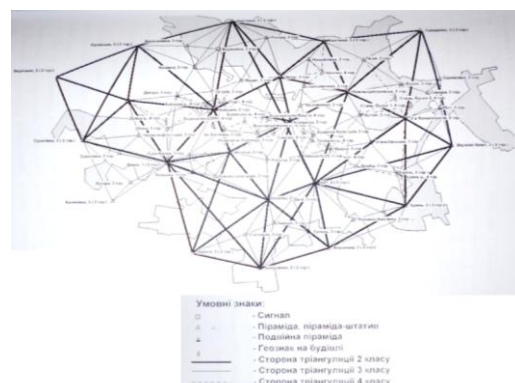


Рис. 2. Схема побудованої міської триангуляції м. Дніпропетровськ (1954 р.) (з 2016 р. м. Дніпро.)

- обстеження та відновлення 944 нівелірних знаків;
- закладка 82 супутників-пунктів ДГМ;
- закладка 2243 пунктів міської ГМ із стінними знаками;
- визначення координат 251 пункту супутниковими методами у статичному режимі;
- лінійно-кутові вимірювання на 1 750 пунктах міської ГМ 1 розряду;
- нівелювання III–IV класів і технічне нівелювання (720 пог. км);
- опрацювання GPS-спостережень 1, 2, 3 і 4 класів (251 пункт);
- вимірювання міської ГМ та обчислення координат 1750 пунктів;
- складання каталогів пунктів ДГМ та міської ГМ у місцевій системі координат (3 515 пункти);
- складання технічного звіту з реконструкції міської ГМ.

Геодезична основа м. Дніпро включає:

- сегмент Української постійнодіючої мережі спостережень Глобальних навігаційних супутникових систем (УПМ ГНСС);
- ДГМ 1 класу;
- триангуляцію та полігонометрію 2–4 класів ДГМ;
- міську триангуляцію 2–4 класів та полігонометрію 4 класу, 1, 2 розрядів міської ГМ;
- висотну основу у вигляді нівелірних мереж I, II та III класів.

Координати пунктів УПМ ГНСС та ДГМ 1 класу обчислені у Світовій земній референційній системі на епоху 2000 року (ITRS/ ITRS2000) та УСК-2000.

Координати пунктів триангуляції та полігонометрії 2–4 класів ДГМ обчислені в системі координат 1942 року та УСК-2000. Координати пунктів міської триангуляції та полігонометрії 4 класу та 1, 2 розрядів міської ГМ обчислені у місцевій системі координат м. Дніпропетровськ на епоху 1961 року.

З метою модернізації міської геодезичної мережі м. Дніпро було виконано комплекс геодезичних робіт з часткового обстеження пунктів ДГМ та міської триангуляції у

кількості 33 пунктів. Перевага під час обстеження була надана пунктам, до яких був забезпечений вільний доступ, тобто пункти, що були закладені на будівлях, не обстежувалися. Всі обстежені пункти збереглися. На 31 обстежених пунктах ДГМ та міської триангуляції було виконано супутникові геодезичні обстеження, при цьому СКП обчислених координат не перевищили 0,02 м.

Відомості про обстежені пункти ДГМ наведені у таблиці 4.

Таблиця 4

Список обстежених пунктів ДГМ 1, 2, 3, 4 класів на території м. Дніпро

№ з/п	Назва	клас	тип знаку	Зберігся	
				знак	центр
1	Байдужево	2	пір.	так	так
2	Берег	3 гор.	пір.	ні	так
3	Березанівка	3 гор.	пір.	так	так
4	Беречине	3	пір.	так	так
5	Верхній Бекет	3	пір.	так	так
6	Ворошилова	3	пір.	ні	так
7	Горяннівське	3	пір.	ні	так
8	Гостра	3 гор.	пір.	так	ні
9	Дамба	3 гор.	пір.	ні	так
10	Діївка	3 гор.	пір.	так	так
11	Дороге	3	пір.	ні	так
12	Жальбівка	2	б.з.з.	ні	так
13	Ім. К.Маркса	1	б.з.з.	ні	так
14	Калинівка	3	пір.	так	так
15	Кам'янка	2	б.з.з.	ні	так
16	Лоцмано-Кам'янка (нова)	4 гор.	пір.	так	так
17	Лугова	3 гор.	пір.	ні	так
18	Одинковка	3 гор.	пір.	ні	так
19	Пашена Балка	3	пір.	ні	так
20	Підгородне	3	пір.	так	так
21	Польовий	3 гор.	пір.	ні	ні
22	Попова Балка	2	пір.	ні	так
23	Рдг.ім. Петр-го	1	пір.	так	так
24	Сурсько-Лит-ке	3	пір.	ні	ні
25	Сурсько-Покровське	3	пір.	так	так
26	Сухачівка	3 гор.	пір.	ні	так
27	Східний	4 гор.	пір.	так	так
28	Татарка Нова	4 гор.	пір.	ні	так
29	Чаплі	2	пір.	так	так
30	Червонофлотськ а	3 гор.	пір.	так	так
31	Яцова	3	пір.	ні	так

Всього із 31 пунктів ДГМ на території м. Дніпро (табл. 4): 1 клас – 2 пункти; 2 клас

– 5 пунктів; 3 клас – 21 пункт; 4 клас – 3 пункти. У 12 пунктів із 31 збереглися і центр і знак; у двох пунктів відсутній центр і знак за результатами пошуку; у решти пунктів збереглися або центр або знак.

Серед 204 обстежених пунктів міської ГМ м. Дніпро виявились знищеними 61 пункт. Якщо врахувати, що інші 143 пункти зберегли стали положення координат, або мають середню квадратичну помилку в межах допуску, то в такому випадку ймовірність безвідмовної роботи міської ГМ буде: $P = 143/204 = 0,7 = 70 \%$. У більшості випадків під впливом техногенних та природних чинників відбуваються зміни просторового положення пунктів геодезичних мереж, а іноді їх знищення, тому потрібно систематично проводити геодезичний моніторинг з обстеженням стану пунктів та відновлювати їх для забезпечення безвідмовної роботи геодезичної мережі.

Для оцінки надійності геодезичної мережі м. Дніпро за методом Монте-Карло було згенеровано 5 100 вибірок для моделювання ймовірнісних процесів втрати

стійкого, незмінного положення геодезичних пунктів планової мережі.

Комплексний вплив техногенних та природних чинників викликає зміщення геодезичних пунктів, а іноді й знищення їх, що призводить до зниження надійності геодезичної мережі. Оцінено ймовірність безвідмовної роботи ГМ на рівні не менше 80 % за умови наявності випадкових відхилень у плановому положенні пунктів мережі, що перевищують граничні значення для даного класу точності у кожній з 5 100 згенерованих ітерацій.

Розрахунок загальної СКП положення кожного пункту геодезичної мережі м. Дніпро здійснено за формулою:

$$M = \pm\sqrt{M_x^2 + M_y^2}, \quad (1)$$

де M_x, M_y – СКП координат пункту.

Були введені наступні критерії відбору допустимих значень СКП положення геодезичних пунктів на рівні не більше 0,03 м для 1 класу; не більше 0,04 м для 2 класу та не більше 0,05 м для 3–4 класу.

Результати обчислень виконані у таблиці Excel (рис. 3).

1 пункт	А	В	С	Д	Е	Г	Н	І	К	Л	М	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW		
№ з/п	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	Мх	My	М	допуск	п	Р	
3	1	0,01	0,02	0,02	1	0,02	0,02	0,031	0	0,05	0,02	0,049	0	0,018	0,008	0,02	1	0,046	0,03	0,053	0	0,05	0,01	0,053	0	0,06	0,04	0,0722	0	23	0,742
4	2	0,01	0,01	0,01	1	0,02	0,02	0,03	1	0,01	0,03	0,033	1	0,03	0,03	0,042	1	0,033	0,05	0,057	0	0,05	0,04	0,0625	0	0,06	0,03	0,0641	0	26	0,839
5	3	0,02	0,02	0,02	1	0	0,01	0,014	1	0,01	0,03	0,029	1	0,029	0,008	0,03	1	0,018	0,06	0,062	0	0,05	0,05	0,0716	0	0,01	0,04	0,042	1	27	0,871
6	4	0,02	0,02	0,03	1	0	0,01	0,008	1	0,04	0,03	0,053	0	0,022	0,026	0,034	1	0,031	0,04	0,05	1	0,01	0,07	0,07	0	0,01	0,06	0,063	0	26	0,839
7	5	0,02	0,02	0,03	1	0,01	0,01	0,011	1	0,03	0,02	0,033	1	0,023	0,003	0,023	1	0,019	0,05	0,053	0	0,03	0,04	0,0517	0	0,05	0,06	0,0711	0	26	0,839
8	6	0,03	0,01	0,03	1	0,02	0	0,02	1	0,01	0,02	0,021	1	0,009	0,027	0,028	1	0,056	0,07	0,089	0	0,02	0,03	0,0394	1	0,06	0,06	0,0905	0	28	0,903
9	7	0,03	0,01	0,03	1	0,01	0,01	0,012	1	0,05	0	0,048	0	0,006	0,013	0,014	1	0,014	0,04	0,041	1	0,04	0	0,0351	1	0,04	0,04	0,0559	0	26	0,839
10	8	0,02	0,03	0,03	1	0,02	0,02	0,023	1	0,04	0,04	0,057	0	0,025	0,021	0,033	1	0,049	0,02	0,052	0	0	0	0,002	1	0,03	0,06	0,0664	0	26	0,839
11	9	0,02	0	0,02	1	0,01	0,01	0,013	1	0,05	0,03	0,059	0	0,027	0,024	0,036	1	0,048	0,03	0,059	0	0,07	0,02	0,0723	0	0,04	0,05	0,0644	0	24	0,774
12	10	0	0,01	0,01	1	0,01	0,02	0,021	1	0,02	0,04	0,043	0	0,025	0,018	0,031	1	0,044	0,02	0,049	1	0,03	0,04	0,0514	0	0,04	0,06	0,0734	0	27	0,871
13	11	0,01	0,01	0,02	1	0	0,02	0,021	1	0	0,02	0,022	1	0,013	0,004	0,014	1	0,027	0	0,027	1	0,06	0,06	0,0835	0	0,03	0,01	0,0361	1	27	0,871
14	12	0	0,01	0,01	1	0,01	0,01	0,013	1	0,05	0,02	0,053	0	0,026	0,01	0,028	1	0,061	0,07	0,093	0	0,01	0,06	0,0622	0	0,02	0,07	0,0687	0	25	0,806
15	13	0,02	0	0,02	1	0,02	0,01	0,018	1	0,05	0	0,046	0	0,008	0,005	0,009	1	0,069	0,03	0,077	0	0,01	0,04	0,0369	1	0,02	0,05	0,0565	0	27	0,871
16	14	0,01	0,01	0,01	1	0	0,01	0,014	1	0,02	0,03	0,03	1	0,019	0,019	0,035	1	0,038	0,04	0,054	0	0,06	0,06	0,0835	0	0,07	0,01	0,0692	0	25	0,806
17	15	0,02	0,02	0,02	1	0,02	0,03	0,034	0	0,04	0,02	0,043	0	0,015	0,025	0,029	1	0,064	0,06	0,086	0	0,03	0,06	0,0662	0	0,06	0,03	0,0647	0	25	0,806

Рис. 3. Фрагмент таблиці Excel з розрахунками СКП положення пунктів ДГМ на території м. Дніпро

Генерування численних сценаріїв із систематичними й випадковими похибками (рис. 3), дозволяє отримати розподіл

можливих результатів СКП місцеположення геодезичних пунктів різних класів (елементів технічної системи) та оцінити надійність ГМ

(технічної системи), тобто ймовірність її безвідмовної роботи.

У стовпцях «Е», «І» з надписом «допуск» (рис. 3) цифра «0» означає, що не виконується умова $M < 0,03$ м СКП для пунктів 1 класу (ім. К. Маркса, Рдг ім. Петровського), цифра «1» – умова виконується. Аналогічно для пунктів 2 класу допуск на СКП буде $M < 0,04$ м, що позначено «0» або «1» наведено у стовпцях «М», «Q», тощо (пункти Байдужеве, Жальбівка та ін.) (рис. 3). Для пунктів 3 та 4 класу, допуск на похибку буде $M < 0,05$ м.

Для кожної ітерації розрахована у останній колоночці «DW» (рис. 3) ймовірність настання сприятливої події за формулою:

$$P = \frac{n}{N} \cdot 100 \% \quad (2)$$

За результатами моделювання 5 100 ітерацій СКП для 31 геодезичного пункту обчислено середнє значення ймовірності бевідмовної роботи геодезичної мережі на рівні 82,5 %, що задовольняє очікуваному критерію 80 %, але є критичним. Аналіз статистичних даних показав, що найбільший вплив на безвідмовну роботу ГМ будуть мати саме пункти 3 класу, оскільки їх кількість найбільша – 21 із 31. Крім того, пункти 3-го та 4-го класів найбільш активно використовуються для подальшого розвитку та згущення геодезичних мереж. Саме на їх основі виконується створення знімальних та інженерно-геодезичних мереж, що зумовлює підвищені вимоги до їх точності, стабільності та надійності. Тому забезпечення відновлення належного точного та технічного стану виявлених пунктів цих класів має важливе значення для ефективного функціонування всієї геодезичної інфраструктури.

Висновки та перспективи розвитку напрямку. Застосований чисельний імітаційний статистичний метод Монте-Карло базується на стохастичному моделюванні випадкових величин, суть якого заключається в багаторазовому виконанні симуляції (5 100 раз) з використанням випадкових чисел (СКП

положення геодезичних пунктів) для моделювання поведінки системи (ГМ).

Застосування цього методу дало змогу отримати ймовірнісні значення СКП для кожного з 31 пунктів ДГМ, розташованої на території м. Дніпро. У кожній ітерації було розраховано ймовірність безвідмовної роботи геодезичної мережі міста, яка за результатами моделювання становить 82,5 %.

Для забезпечення надійного функціонування ГМ міста доцільно виконувати попередню комплексну оцінку її точності та надійності на всій території. Особливу увагу слід приділяти проведенню повторних спостережень і перевірці фактичного стану геодезичних пунктів із використанням сучасних супутникових технологій, що дозволяє своєчасно виявляти зміщення або втрату стабільності пунктів. Доцільним є також виконання попередньої оцінки надійності ГМ в окремих районах міста, зокрема в зонах з підвищеним техногенним навантаженням, де спостерігаються максимальні значення зміщень геодезичних пунктів. Отримані результати можуть бути використані як для наукових досліджень, так і для практичних потреб – зокрема, для вибору стабільних і надійних геодезичних пунктів під час виконання топографо-геодезичних зйомок або проведення геодезичного моніторингу інженерних споруд та будівель, що забезпечить достовірність результатів. Крім того, результати дослідження можуть бути використані як основа для планування робіт по відновленню зміщених пунктів, розвитку та згущення ГМ, оптимізації розміщення нових пунктів, а також для підвищення точності інженерно-геодезичних і кадастрових робіт.

Запропонований підхід дозволяє своєчасно виявляти проблемні ділянки мережі, прогнозувати можливі зміщення пунктів у зонах підвищеного техногенного навантаження та приймати обґрунтовані рішення щодо проведення повторних спостережень, оновлення або відновлення геодезичних пунктів. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню надійності

геопросторових даних і безпеки виконання геодезичних робіт у межах міських техногенно-навантажених територій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Порядок обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text>
2. Порядок побудови Державної геодезичної мережі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#n9>
3. Висотенко Р. О. Сучасний стан Державної геодезичної мережі. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/vysotenko_suchasnyj-stan-dgm_2024.pdf
4. Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25#Text>
5. Сосса Б., Гаврищук В. Використання методу Монте-Карло при дослідженні похибок геодезичних приладів. *Технічні науки та технології*. 2025. № 2 (40). С. 472–484. URL: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/337222/325780>
6. Niemeier W., Tengen D. Uncertainty assessment in geodetic network adjustment by combining GUM and Monte-Carlo-simulations. *Journal of Applied Geodesy*. 2017. Vol. 11 (2). URL: <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0017>
7. Neumann I., Alkhatib H., Kutterer H. Comparison of Monte-Carlo and Fuzzy Techniques in Uncertainty Modelling. *FIG Symposium on Deformation Analysis*. Vol. 13. Lisboa, 2018. URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/2008/lisbon_2008_comm6/papers/pas03/pas03_04_neumann_mc083.pdf
8. Siebert B., Sommer K.-D. Weiterentwicklung des GUM und Monte-Carlo-Techniken. *Technisches Messen*. 2004. Vol. 71. Pp. 67–80. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224121010423?via%3Dihub>
9. Ramazan Cuneys Erenoglu. A Novel Robust Scaling for EDM Calibration Baselines using Monte Carlo Study. *Tehnicki vjesnik – Technical Gazette*. 2018. Vol. 25 (1). URL: <https://doi.org/10.17559/tv-20160407214150>
10. Wyszowska P. Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations. *Geodesy and Cartography*. 2017. Vol. 66 (2). Pp. 333–346. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322378849>
Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations

REFERENCES

1. *Poriadok obstezhennia ta onovlennia punktiv Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [Procedure for the Survey and Updating of the State Geodetic Network Points]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text> (in Ukrainian).
2. *Poriadok pobudovy Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [Procedure for the Establishment of the State Geodetic Network]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#n9> (in Ukrainian).
3. Vysotenko R.O. *Suchasnyi stan Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [The Current State of the State Geodetic Network]. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/vysotenko_suchasnyj-stan-dgm_2024.pdf (in Ukrainian).
4. *Poriadok topohrafichnoi ziomky u masshtabakh 1:5000, 1:2000, 1:1000 ta 1:500* [Procedure for Topographic Surveying at Scales 1:5000, 1:2000, 1:1000 and 1:500]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25#Text> (in Ukrainian).
5. Sossa B. and Havryshchuk V. *Vykorystannia metodu Monte-Karlo pry doslidzhenni pokhybok heodezychnykh pryladiv* [Application of the Monte Carlo Method in the Study of Errors of Geodetic Instruments]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii* [Engineering Sciences and Technologies]. 2025, no. 2 (40), pp. 472–484. URL: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/337222/325780> (in Ukrainian).
6. Niemeier W. and Tengen D. Uncertainty assessment in geodetic network adjustment by combining GUM and Monte-Carlo-simulations. *Journal of Applied Geodesy*. 2017, vol. 11 (2). URL: <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0017>
7. Neumann I., Alkhatib H. and Kutterer H. Comparison of Monte-Carlo and Fuzzy Techniques in Uncertainty Modelling. *FIG Symposium on Deformation Analysis*. Lisboa, 2018, vol. 13. URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/2008/lisbon_2008_comm6/papers/pas03/pas03_04_neumann_mc083.pdf
8. Siebert B. and Sommer K.-D. Weiterentwicklung des GUM und Monte-Carlo-Techniken. *Technisches Messen*. 2004, vol. 71, pp. 67–80. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224121010423?via%3Dihub>
9. Ramazan Cuneys Erenoglu. A Novel Robust Scaling for EDM Calibration Baselines using Monte Carlo Study. *Tehnicki vjesnik – Technical Gazette*. 2018, vol. 25 (1). URL: <https://doi.org/10.17559/tv-20160407214150>
10. Wyszowska P. Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations. *Geodesy and Cartography*. 2017, vol. 66 (2), pp. 333–346. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322378849>
Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations

Надійшла до редакції: 28.02.2026.

УДК 699.81:614.84:536.21

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.17.1222

РОЗРОБКА ЗАХИСНОГО СКЛАДУ ТА СПОСОБУ ЙОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ДЕРЕВ'ЯНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЄЮ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,

ТОДОРОВ О. П.², *асп.*,

КОРОТАЄВ В. М.³, *канд. юр. наук.*,

ХАРЧЕНКО В. В.⁴, *доктор філософії*,

КЛИМЕНКО Г. О.^{5*}, *канд. техн. наук., доц.*

¹ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної 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) 523-22-55, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, Тулик Будівельний, 1, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 732-16-93, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0269-0389

⁴ Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, Тулик Будівельний, 1, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 732-16-93, e-mail: harchenko-76@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7653-3001

^{5*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: klimenko.anna@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6885-3144

Анотація. Дерев'яні конструкції широко застосовуються в будівельній галузі, як в Україні, так і в усьому світі. Серед цілої низки позитивних якостей деревини можна виділити її органічність та комфортність, що особливо ціниться при зведенні житла та готельно-курортних комплексів. В той же час, деревина - є горючим матеріалом, і при присутності високотемпературного джерела, здатна стійко горіти. Тому, для забезпечення виконання нормативів із пожежної безпеки при експлуатації таких будівель і споруд, необхідно забезпечити безпеку їх експлуатації в надзвичайних ситуаціях, в тому числі – при виникненні пожежі. Проведений аналіз наукових робіт [1-3] свідчить, що в світовій практиці для зниження горючості деревини застосовують різні захисні засоби. В останніх наукових роботах все більше уваги приділяється деструктивним процесам, що протікають в деревині під дією високих температур з точки зору вигорання поперечного перерізу конструкцій до критичного значення, що може призвести до її обрушення. Складність і взаємозв'язок різних стадій процесу горіння деревини ускладнюють, а іноді й унеможливають, оцінку вогнестійкості та підвищення вогнестійкості будівельних дерев'яних конструкцій. Тому, для дерев'яних конструкцій на сьогодні немає практично перевірених методів оцінки їх вогнестійкої здатності. Розробка захисного складу для захисту дерев'яних матеріалів та конструкцій при дії високих температур - актуальна задача сьогодення. **Мета статті.** Забезпечення безпеки експлуатації дерев'яних конструкцій при дії високих температур за рахунок розробки нових складів захисних покриттів. **Висновки.** 1. На основі проведених досліджень були визначені матеріали і компоненти, які, внаслідок дешевизни, широкого застосування, недифіцитності, підібрані для виготовлення вогнезахисних зпучуючих покриттів. 2. Розроблено вогнезахисний склад та спосіб його застосування, що дозволяє забезпечити високі експлуатаційні властивості деревини в умовах пожежі.

Ключові слова: *пожежна безпека; дерев'яні конструкції; процес горіння; захисне покриття; захисний розчин*

DEVELOPMENT OF A PROTECTIVE COMPOSITION AND METHOD OF ITS PRODUCTION FOR PROTECTION OF WOODEN MATERIALS AND STRUCTURES UNDER THE EXPOSURE OF HIGH TEMPERATURES

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech), Prof.*,

TODOROV O.P.², *Postgrad. Stud.*,

KOROTAIEV V.M.³, *Ph.D. (Juridical)*,

HARCHENKO V.V.⁴, *Ph.D.*,

KLYMENKO G.O.^{5*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Occupational Safety, Civil and Technogenic Security, 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: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Occupational Safety, Civil and Technogenic Security, 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) 523-22-55, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Dnipropetrovsk Scientific Research Forensic Center of the MIA (Ministry of Internal Affairs) of Ukraine, 1, Budivelniiy Dead End, Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 732-16-93, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0269-0389

⁴ Dnipropetrovsk Scientific Research Forensic Center of the MIA (Ministry of Internal Affairs) of Ukraine, 1, Budivelniiy Dead End, Dnipro, 49033, Ukraine, e-mail: harchenko-76@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7653-3001

^{5*} Department of Occupational Safety, Civil and Technogenic Security, 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: klimenko.anna@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6885-3144

Abstract. Wooden structures are widely used in everyday life, both in Ukraine and elsewhere. Among the whole low positive qualities of the village one can see its organic nature and comfort, which is especially valued in the development of hotel-resort complexes. At the same time, wood is a combustible material, and in the presence of a high-temperature flame, it burns reliably. Therefore, in order to ensure compliance with the established standards and safety during the operation of such vessels and spores, it is necessary to ensure the safety of their operation in emergency situations, including in case of accident burn it. An analysis of scientific research [1-3] shows that in light practice, in order to reduce the flammability of wood, various chemical substances are used. In other scientific works, more and more respect is given to the destructive processes that occur in wood under high temperatures from the point of view of the transverse cut of the structure to a critical value, which can lead to it collapse. The foldability and interconnections of the various stages of the mining process complicate, and sometimes make it difficult to assess the susceptibility of wood and the increase in susceptibility of living wood. design. Therefore, for wooden structures today there are no practically verified methods for assessing their structural value. The development of chemical storage for the protection of wooden materials and construction at high temperatures is an urgent task today. **The purpose of the article.** Ensuring the safe operation of wooden structures when exposed to high temperatures by developing new compositions of protective coatings. **Conclusions.** 1. Based on the research, the selected materials and components were selected due to their low cost, wide availability, non-scarcity, and selection for the production of fire-resistant intumescent coatings. 2. The fire-resistant warehouse was dismantled and the method of stagnation was dismantled, which makes it possible to ensure the high operational power of the village in the minds of the former.

Keywords: *fire safety; wooden structures; combustion process; protective coating; protective solution*

Актуальність. Дерев'яні конструкції широко застосовуються в будівельній галузі, як в Україні, так і в усьому світі. Серед цілої низки позитивних якостей деревини можна виділити її органічність та комфортність, що особливо ціниться при зведенні житла та готельно-курортних комплексів. В той же час, деревина - є горючим матеріалом, і при присутності високотемпературного джерела, здатна стійко горіти. Тому, для забезпечення виконання нормативів із пожежної безпеки при експлуатації таких будівель і споруд, необхідно забезпечити безпеку їх експлуатації в надзвичайних ситуаціях, в тому числі – при виникненні пожежі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз наукових робіт [1-3] свідчить, що в світовій практиці для зниження горючості деревини застосовують різні захисні засоби. В останніх наукових роботах все більше уваги

приділяється деструктивним процесам, що протікають в деревині під дією високих температур з точки зору вигорання поперечного перерізу конструкцій до критичного значення, що може призвести до її обрушення. У [4] розглянуто вплив товщини матеріалу на займання та поширення полум'я. В той же час, недостатньо уваги приділяється деструктивним процесам, що притікають в деревині без видимих ознак вигорання, які можуть привести до втрати її цілісності, зниження несучої здатності.

Мета статті. Забезпечення безпеки експлуатації дерев'яних конструкцій при дії високих температур за рахунок розробки нових складів захисних покриттів.

Методи дослідження. При проведенні досліджень було проведено аналіз фундаментальних досліджень з питань вогнезахисту та використовувались

стандартні методи визначення пожежної небезпеки.

Результати досліджень. Складність і взаємозв'язок різних стадій процесу горіння деревини ускладнюють, а іноді й унеможливають, оцінку вогнестійкості та підвищення вогнестійкості будівельних дерев'яних конструкцій. Тому, для дерев'яних конструкцій на сьогодні немає практично перевірених методів оцінки їх вогнестійкої здатності.

У зв'язку з цим, для більш повного розуміння процесів, що відбуваються, виникла необхідність подальшого теоретичного вивчення прогріву і горіння деревини при вогневому впливі на пожежі.

Розглянемо складний процес горіння, умовно розбиваючи його на характерні стадії, які можуть суттєво вплинути на оцінку вогнестійкості конструкції.

Для захисту деревини застосовують різні захисні засоби при будівництві та експлуатації цивільних і промислових будівель і споруд, при цьому найбільший інтерес представляють покриття, що мають підвищені атмосферо- і водостійкі властивості складу і покриття при збереженні або поліпшенні його захисних властивостей.

Відомий спосіб виготовлення захисного складу, що містить рідке скло та азбест при наступному співвідношенні компонентів 1:10-5:10 (А.с. 337528 СССР опубл. 03.11.95, бюл. № 3). Недоліком цього способу є зниження захисної здатності адгезійної міцності в часі в результаті зміни його цілісності, нетехнологічності нанесення на будівельну конструкцію та вуглекислотної корозії.

Найближчим аналогом до запропонованого способу є захисний склад (патент України № 114061, опубл. 27.02.2017, бюл. №4) при наступному співвідношенні компонентів, мас. %:

1. Лускатий графіт – 17 – 20.
2. Епоксидна смола з затверджувачем – 15 – 17.
3. Зола виносу – 1 – 3.
4. Рідке скло – решта.

Недоліком аналогу є висока тріщинуватість покриття, зниження захисної

здатності в вологих приміщеннях, а при дії високої температури – розклад з виділенням токсичних продуктів.

Для вдосконалення захисної здатності покриття, зниження тріщинуватості, високої адгезійної міцності було запропоновано провести вибір компонентів та провести дослідження їх впливу на властивості захисних складів та покриття після затвердіння.

Враховуючи широке застосування рідкого скла в якості зв'язуючого в захисних складах [5], нами було прийняте в якості компонента рідке скло – водний розчин силікатів натрію $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ (при щільності 1,3–1,6 г/см³ і силікатів калію $\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ (при щільності 1,25–1,4 г/см³), ТУ 21875464.004-98.

Складність нанесення рідкого скла на поверхню, що захищається, виробів ускладнює його стікання з поверхні в «чистому» виді. Крім того, після затвердіння на поверхні захисний шар постійно розтріскується, що призводить до повторного нанесення шару на поверхню для досягнення визначеної захисної здатності.

Тому, нами було проведено дослідження по вивченню технологічних властивостей складів та захисної їх здатності при внесенні додаткових компонентів. При проведенні досліджень з урахуванням властивостей був проведений вибір наступних компонентів:

– зола виносу, ТУ 12.36.341-91, при наступному хімічному складі (зміст окислів, % по масі):

1. SiO_2 : 39,5 – 62,7;
2. Al_2O_3 : 13,5 – 35,5;
3. CaO : 2,5 – 5,9;
4. MgO : 1,5 – 4,3;
5. Fe_3O_4 : 8,5 – 12,8;
6. $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$: 2,1 – 3,5;

– спучений вермикуліт – мінерал з групи гідрослюд, що мають шарувату структуру. Має високу температуру плавлення – 1350 °С. При нагріванні до температури +900 – +1000 °С спучується в обсязі в 15–25 разів. Біологічно стійкий – не схильний до розкладання і гниття під дією мікроорганізмів, ДСТУ Б.В.2.7-280:2011 (ГОСТ 12865-67);

– лускатий графіт. У лускатого графіту

кристали мають форму пластинок або листочків у жирному пластичному вигляді і мають металевий блиск. Лускатий графіт стійкий до агресивного середовища та високих температур. Має високу температуру плавлення – 3845–3890 °С при тиску від 1 до 0,9 атм, ГОСТ 17022-81;

– портландцемент М 400 ДСТУ Б В.2.7-46:2010 (загальнобудівельного призначення);

– гідрофобізатор метилсиліконат натрію ГКЖ-11. Прозора рідина від блідо-жовтого до коричневого кольору, ТУ 2229-68-

05808020-00.

До основних технологічних властивостей захисних складів відносяться: в'язкість та час затвердіння. При дослідженні за сталу складову приймали різне скло та воду в кількості 30-60 % від вагомому вмісту компонентів (рідке скло 3-5 %), а перемінними були тонкомолоті компоненти: зола виносу, спучений вермикуліт, лускатий графіт, портландцемент. На рисунку 1 наведена зміна технологічних властивостей захисних складів в залежності від вмісту портландцементу.

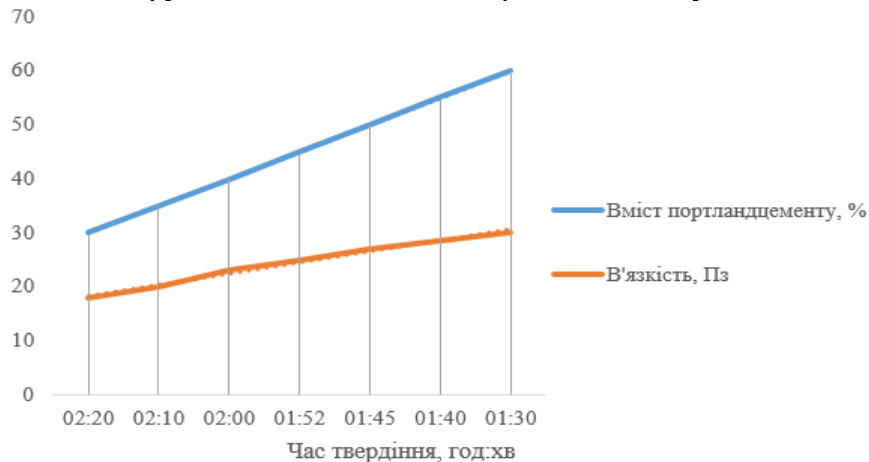


Рис. 1. Зміна технологічних властивостей захисних складів залежно від вмісту портландцементу

Згідно проведених досліджень, введення портландцементу в водний розчин призводить до утворення суміші, що здатна в залежності від вмісту портландцементу

схоплюватися та затверджувати на протязі 1 год. 30 хв. До 3 год. 08 хв. При цьому, консистенція суміші складала від 12.0 Пз до 30,0 Пз.

Таблиця

Вміст компонентів, % по масі 3 (аналог – патент України № 114061 від 27.02.2017р.)

Компоненти суміші	1	2	3	4	Найбл. аналог
портландцемент	20	30	40	50	-
лускатий графіт	3	4	4	5	20
зола виносу	5	7	8	10	3
спучений вермикуліт	30	30	40	40	-
рідке скло	3	4	4	5	решта
гідрофобізатор	0,2	0,3	0,5	0,7	-
епоксидна смола з затверджувачем	-	-	-	-	15

Після обробки одержаних даних на ЕВМ були отримані залежності, що дозволяють прогнозувати зміну технологічних властивостей складів в залежності від вмісту портландцементу.

Зміна в'язкості:
 $y = 5x + 25$.

Час затвердження складу:
 $y = 2,0321x + 16,371$.

Після нанесення вогнезахисної композиції на конструкції відбувається її тужавлення та твердіння, що призводить до утворення покриття з відповідними захисними властивостями.

При цьому досліджувались склади, наведені в таблиці.

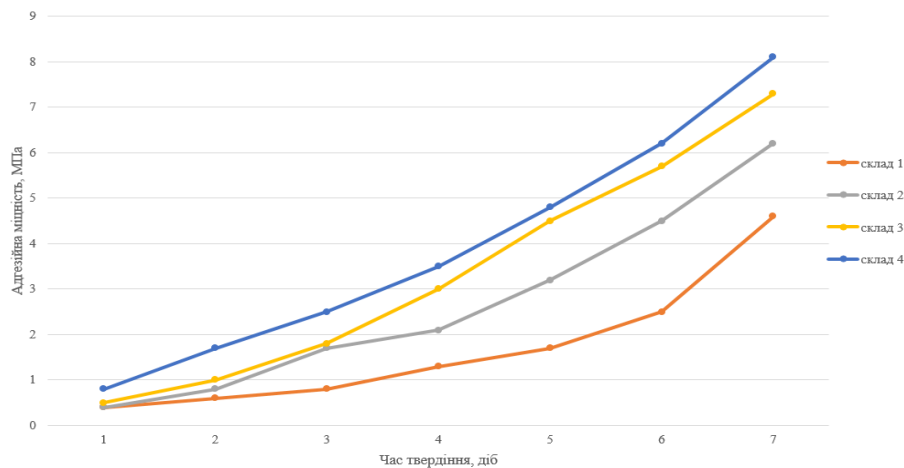


Рис. 2. Зміна адгезійної міцності при твердінні складів 1, 2, 3, 4 в часі

На рисунку 2 наведені результати досліджень адгезійної міцності в часі твердіння.

Як показали проведені дослідження (рис. 2), при введенні в склад портландцементу до 20 % (склад 1) набір адгезійної міцності відбувається практично після 4-8 днів твердіння. При цьому міцність складає до 0,4-0,6 МПа і тільки після 28 днів досягає 4,6 МПа, що дозволяє безпечно експлуатацію конструкції з урахуванням збереження складу на поверхності.

Дослідження дозволили визначити граничні умови з урахуванням адгезійної міцності застосування складів 1, 2, 3, 4.

Порівняльні випробування аналогу показали, що цей склад практично не здатен забезпечити мінімальну адгезійну міцність з покриття на протязі 16 днів твердіння і тільки по досягненні 28 днів максимальна адгезія на міцність складає 5,2 МПа.

Після обробки одержаних даних на ЕВМ були отримані залежності адгезійної міцності покриття в часі в залежності від складу.

Для складу 1:
 $y = 0,3007x^{1,1726}$.

Для складу 2:
 $y = 0,3516x^{1,4008}$.

Для складу 3:
 $y = 0,432x^{1,4194}$.

Для складу 4:
 $y = 0,7543x^{1,1654}$.

Отримані залежності дозволяють

прогнозувати величини адгезійної міцності в залежності від часу твердіння.

Проведені дослідження показали, що адгезійна міцність для запропонованих складів в віці 360 днів залишається стабільною на відміну від розглянутого аналогу.

Визначено, що в складах 1, 2, 3, 4 витримки зразків в умовах $t = 8-23$ °С, W до 75 % протягом 360 днів не відбувається зниження адгезійної міцності. В аналогу за цей час відбулося зниження адгезійної міцності на 26-27 %. Крім того, на зразках було визначено розтріскування захисного складу, що потребує додаткового оброблення поверхні для захисту.

Проведені дослідження показали, що захисне покриття при дії високих температур, починаючи з 300-350 °С, здатне вспінюватися – в результаті вспінювання на поверхні, що захищається, виникає високопоризований шар з низькою теплопровідністю.

В подальшому нами було проведено дослідження захисної здатності покриття на зразках із деревини 150×60×30 мм.

Визначення вогнезахисної здатності запропонованого покриття проводили згідно ДСТУ 8829:2019. Згідно проведених досліджень, захисне покриття дозволяє переведення деревини в групу важкоспалюваних, втрати маси менше ніж 9 %, як в віці 28 днів, так і в віці 360 днів. Випробування самого покриття на горючість показало, що воно відноситься до негорючих матеріалів.

На рисунку 3 наведено втрату маси дерев'яних зразків при випробуваннях, що були витримані протягом 28 діб та 360 діб).

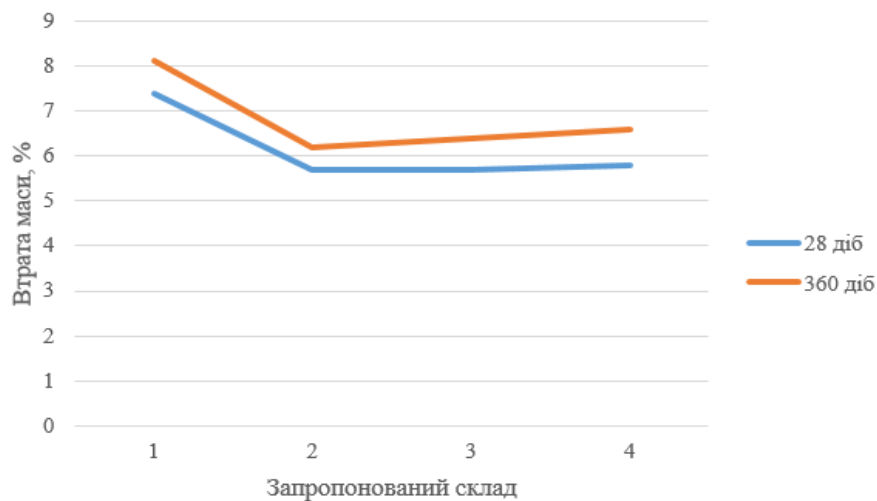


Рис. 3. Втрата маси зразків за 28 та 360 діб, мас. %

Порівняльний аналіз запропонованих складів 1, 2, 3, 4 та аналогу показав, що по показникам: адгезійна міцність та втрата маси зразків у покриттів після витримки 28 діб та 360 діб запропоновані склади відповідають вимогам пожежної безпеки, як захисне покриття. Значні втрати маси дерев'яних зразків покритих аналогом, мають втрату по масі до 12,4 % після витримки 28 діб, а з часом вона в віці 360 діб досягає 22,2 %, що не відповідає вимогам захисту.

Проведені дослідження показали, що захисне покриття на основі аналогу має низьку водостійкість. Так через 72 години витримані зразки покриття втратили до 25 % складу за рахунок присутності не зв'язаної частини рідкого скла (в складі воно сягає 40-50 %).

Запропонований спосіб виготовлення вогнезахисного покриття дозволяє підвищити адгезійну міцність, як у віці

28 діб, так і у віці 360 діб в 1,8–2,0 рази відносно адгезійної міцності відомого способу. Вогнезахисне покриття запропонованого способу забезпечує переведення деревини в розряд важкоспалювальних, втрата маси менше ніж 9 % у віці 360 діб. Втрата маси аналога у віці 360 діб складає 22,1 %, що не відповідає вимогам пожежної безпеки.

Висновки

1. На основі проведених досліджень були визначені матеріали і компоненти, які, внаслідок дешевизни, широкого застосування, недифіцитності, підібрані для виготовлення вогнезахисних зпучуючих покриттів.

2. Розроблено вогнезахисний склад та спосіб його застосування, що дозволяє забезпечити високі експлуатаційні властивості деревини в умовах пожежі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Zhan W., Chen L., Cui F., Gu Z. & Jiang J. Effects of carbon materials on fire protection and smoke suppression of waterborne intumescent coating. *Progress in Organic Coatings*. 2020.
- Maria Zielecka, Anna Rabajczyk, Krzysztof Cygańczuk, Łukasz Pastuszka, Leszek Jurecki. Silicone Resin-Based Intumescent Paints. *Materials*. 2020. № 13 (21). P. 4785.
- Geoffroy L., Samyn F., Jimenez M., Bourbigot S. Intumescent Polymer Metal Laminates for Fire Protection. *Polymers*. 2018. № 10 (9). P. 995.
- Michael Delichatsios. Effects of material thickness on ignition times and creeping flame spread in the thermal regime : Theory, analytical solution and experimental justification. *Fire Safety Journal*. Elsevier, September, 2020.
- Беліков А. С. Зниження горючості і підвищення вогнестійкості будівельних дерев'яних конструкцій за рахунок застосування вогнезахисних покриттів (на прикладі підприємств вугільної промисловості) : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.02 – Пожежна безпека. Харків, 2001.

REFERENCES

1. Zhan W., Chen L., Cui F., Gu Z. and Jiang J. Effects of carbon materials on fire protection and smoke suppression of waterborne intumescent coating. *Progress in Organic Coatings*. 2020.
2. Maria Zielecka, Anna Rabajczyk, Krzysztof Cygańczuk, Łukasz Pastuszka and Leszek Jurecki. Silicone Resin-Based Intumescent Paints. *Materials*. 2020, no. 13 (21), p. 4785.
3. Geoffroy L., Samyn F., Jimenez M. and Bourbigot S. Intumescent Polymer Metal Laminates for Fire Protection. *Polymers*. 2018, no. 10 (9), p. 995.
4. Michael Delichatsios. Effects of material thickness on ignition times and creeping flame spread in the thermal regime: Theory, analytical solution and experimental justification. *Fire Safety Journal*. 2020.
5. Byelikov A.S. *Znizhennya goryuchosti i pidvishennya vognestijkosti budivelnih derev'yanih konstrukcij za rahunok zastosuvannya vognazahisnih pokrittiv (na prikladi pidpriemstv vugilnoyi promislovosti) : dis. ... d-ra tehn. nauk : 21.06.02 – Pozhezhna bezpeka* [Reducing flammability and increasing fire resistance of wooden building structures through the use of fire-retardant coatings (on the example of coal industry enterprises) : dissertation ... Dr. Tech. Sciences : 21.06.02 – Fire safety]. Harkiv, 2001. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.02.2026.

УДК 624.04:624.042.3

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.24.1223

РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ. СУЧАСНІ ПІДХОДИ. СЕЙСМІКА ТА ВИБУХ (огляд)

ВОЛЧОК Д. Л.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
КОЖЕМЯКІНА І. Ф.², канд. техн. наук, доц.,
ЗАВАРИКІН С. Л.³, асп.,
САХАРЧУК С. В.⁴, асп.

^{1*}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) 727-65-60, e-mail: denys.l.volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

²Кафедра 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 (099) 156-29-89, e-mail: kozhem.irina@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6987-8936

³Кафедра 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. +380 (063) 448-16-21, e-mail: zavarykin@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0942-8247

⁴Кафедра 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 (093) 368-73-03, e-mail: sakharchuk.serhii@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-5037-2905

Анотація. Актуальність роботи. Проблеми інженерії завжди були пов'язані з безпекою та надійністю елементів конструкцій і споруд. У сучасних умовах забезпечення надійності та безпеки будівельних конструкцій великого значення набуває здатність урахування динамічних навантажень різної природи – від сейсмічних коливань до вибухових впливів. Характерною особливістю цих навантажень є висока невизначеність параметрів. Найчастіше до розрахунку конструкцій у динаміці здебільшого спираються на детерміновані схеми аналізу. Вони не дозволяють врахувати вплив невизначеностей на кінцеві інженерні рішення. Це призводить до можливого заниження або завищення оцінок ризику. Актуальним залишаються дослідження, що спрямовані на підвищення точності та надійності прогнозування поведінки елементів будівельних конструкцій при дії динамічних навантажень. **Мета дослідження** – проведення комплексного огляду сучасних підходів до моделювання динамічної поведінки елементів конструкцій під дією сейсмічних та вибухових навантажень з урахуванням алеторних та епістемічних невизначеностей, з подальшою пропозицією уніфікованої методичної рамки для досліджень і інженерної практики. **Методика.** Застосовано метод аналізу науково-технічної літератури щодо сучасних напрямків досліджень з урахуванням невизначеностей. **Результати.** У статті подано огляд сучасних підходів до моделювання динамічної відповіді конструктивних елементів за умов значних алеторних і епістемічних невизначеностей. Узагальнено результати останніх робіт зі сейсмічної крихкості (fragility) на основі стохастичних моделей ґрунтових рухів та метамодельовання (Kriging, SPCE, DR-SM), а також досліджень вибухових навантажень – від аналітичних енергетичних моделей тонкостінних оболонок до FSI-розрахунків ударних хвиль із тонкими пластинами, P-I діаграм, внутрішніх вибухів у сталевих боксах і вузлів залізобетонних каркасів. На цій основі пропонується уніфікована методична рамка для подальших досліджень і практики проектування: від формалізації невизначеностей до побудови функцій придатності та стандартизованих критеріїв прийняття рішень.

Ключові слова: невизначеність; алеторна; епістемічна; сейсмічна крихкість; сурогатні моделі; SPCE; Kriging; DR-SM; вибухове навантаження; P-I діаграма; FSI

DEVELOPMENT OF THE THEORY OF STRUCTURAL ELEMENT ANALYSIS UNDER DYNAMIC LOADS IN THE PRESENCE OF UNCERTAINTIES. CONTEMPORARY APPROACHES. SEISMIC AND BLAST LOADS (overview)

VOLCHOK D.L.^{1*}, D.Sc., Assoc. Prof.,

KOZHEMIAKINA I.F.², *PhD, Assoc. Prof.*,
ZAVARYKIN S.L.³, *PhD Stud.*,
SAKHARCHUK S.V.⁴, *PhD Stud.*

^{1*} 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) 727-65-60, e-mail: denys.l.volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

² 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 (099) 156-29-89, e-mail: kozhem.irina@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6987-8936

³ 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. +380 (063) 448-16-21, e-mail: zavarykin@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0942-8247

⁴ 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 (093) 368-73-03, e-mail: sakharchuk.serhii@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-5037-2905

Abstract. Relevance of the work. Engineering problems have always been closely associated with the safety and reliability of structural elements and facilities. Under modern conditions, ensuring the reliability and safety of building structures requires the capability to account for dynamic loads of various origins – from seismic ground motions to blast effects. A characteristic feature of these loads is the high level of uncertainty in their parameters. In most cases, dynamic analysis of structures relies predominantly on deterministic analytical schemes, which do not allow the influence of uncertainties on final engineering decisions to be fully captured. As a result, this may lead to an underestimation or overestimation of risk. Research aimed at increasing the accuracy and reliability of predicting the behavior of structural elements under dynamic loading therefore remains highly relevant. **Purpose of the study** is to conduct a comprehensive review of modern approaches to modeling the dynamic behavior of structural elements under seismic and blast loads, taking into account aleatory and epistemic uncertainties, and to propose a unified methodological framework for further research and engineering practice. **Methodology.** The study employs an analysis of scientific and technical literature focused on contemporary research directions involving uncertainty quantification. **Results.** The article provides an overview of current approaches to modeling the dynamic response of structural elements under significant aleatory and epistemic uncertainties. It summarizes the findings of recent studies on seismic fragility based on stochastic ground-motion models and surrogate modeling techniques (Kriging, SPCE, DR-SM), as well as research on blast loading – ranging from analytical energy-based models of thin-walled shells to FSI simulations of shock-wave interaction with thin plates, pressure–impulse (P–I) diagrams, internal detonations in steel box structures, and reinforced-concrete frame joints. Based on these developments, the article proposes a unified methodological framework for further research and design practice – from the formalization of uncertainties to the development of performance (fitness) functions and standardized decision-making criteria.

Keywords: *uncertainty; aleatory; epistemic; seismic fragility; surrogate models; SPCE; Kriging; DR-SM; blast loading; P–I diagram; FSI*

Вступ. У сучасних умовах забезпечення надійності та безпеки будівельних конструкцій дедалі більшого значення набуває здатність урахування динамічних навантажень різної природи - від сейсмічних коливань до вибухових впливів. Характерною особливістю цих навантажень є висока невизначеність параметрів: спектральних характеристик ґрунтових рухів, інтенсивності та форми імпульсу вибуху, властивостей матеріалу конструкційних елементів, умов їх закріплення та взаємодії з навколишнім середовищем. Невизначеність має як алеторний характер (випадковість дії збурення), так і епістемічний (неповнота

знань про модель, процесу руйнування, точні параметри системи).

Традиційні підходи до розрахунку конструкцій у динаміці здебільшого спираються на детерміновані схеми аналізу, які не дозволяють коректно врахувати вплив невизначеностей на кінцеві інженерні рішення. Це призводить до можливого заниження або завищення оцінок ризику, що є критично небезпечним у сфері проектування стратегічно важливих об’єктів.

У відповідь на ці виклики у наукових дослідженнях останніх років активно розвиваються методи:

1. сейсмічної крихкості (fragility analysis) з використанням стохастичних

моделей ґрунтових рухів, побудови метамodelей (Kriging, стохастичні розкладення поліномного хаосу - SPCE, моделі зі зменшенням розмірності - DR-SM), що дозволяють поєднувати обчислювальну ефективність і достовірність;

2. оцінки вибухостійкості, що охоплюють як аналітичні енергетичні моделі, так і спрощені P-I діаграми, а також повноцінні чисельні підходи до взаємодії рідина-конструкція (FSI - fluid-structure interaction), здатні описувати нелінійну поведінку тонкостінних елементів і складних вузлів;

3. використання безрозмірних критеріїв і скейлінгових залежностей, які дають можливість узагальнювати результати експериментів та чисельних розрахунків для різних геометрій і умов навантаження;

4. метод глобальної чутливості та невизначеності, що дозволяють відокремити ключові фактори, які найбільше впливають на динамічну відповідь конструкцій.

Таким чином, проблема полягає не лише у правильному розрахунку елементів конструкцій при дії динамічних навантажень, але й у створенні уніфікованої методичної основи, яка поєднає:

1. формалізацію невизначеностей;
2. побудову функцій крихкості та придатності;
3. використання багаторівневих modelей (від спрощених до FSI);
4. інтеграцію обчислювально ефективних сурогатних підходів.

Саме така рамка дозволить розвинути теорію розрахунку елементів будівельних конструкцій і забезпечити підвищення точності прогнозів їх поведінки в умовах складних і небезпечних динамічних впливів.

Мета дослідження. Проведення комплексного огляду сучасних підходів до моделювання динамічної поведінки елементів будівельних конструкцій під дією сейсмічних та вибухових навантажень з урахуванням алеторних та епістемічних невизначеностей, з подальшою пропозицією уніфікованої методичної основи для досліджень і інженерної практики.

Методика. На підставі аналізу сучасної літератури систематизувати методологічні підходи, які застосовуються у світовій науковій практиці для аналізу невизначеностей, побудови кривих крихкості та функцій придатності конструкцій.

Охарактеризувати сучасні інструменти сурогатного моделювання (Kriging, SPCE, DR-SM) та їх роль у зменшенні обчислювальних витрат без втрати достовірності результатів.

Узагальнити результати досліджень вибухових навантажень, зокрема підходи до побудови P-I діаграм, безрозмірних критеріїв та modelей FSI, що відображають складні нелінійні ефекти взаємодії ударних хвиль із конструкціями.

Виявити напрями подальших досліджень, які мають безпосереднє значення для розвитку теорії розрахунку конструкцій в умовах невизначеностей.

Досягнення зазначених завдань дозволить сформуванню уніфікованої методичної основи, придатної для використання в дослідженнях, спрямованих на підвищення точності та надійності прогнозування поведінки будівельних конструкцій у складних динамічних режимах.

Основні результати досліджень. В останні два десятиліття у світовій науковій літературі спостерігається суттєвий прогрес у напрямі врахування невизначеностей у розрахунках динамічної поведінки елементів будівельних конструкцій. Дослідники дедалі більше відходять від традиційних детермінованих методів і переходять до імовірнісних та гібридних підходів, які дозволяють відтворювати складну стохастичну природу навантажень та їх вплив на надійність конструктивних систем.

У сфері сейсмостійкого будівництва значного поширення набули дослідження, орієнтовані на парадигму Performance-Based Earthquake Engineering (PBEE), що передбачає багаторівневий аналіз від опису ґрунтових рухів до побудови кривих крихкості та функцій збитків. Тут велику роль відіграють методи сурогатного

моделювання - стохастичні розкладення поліномного хаосу, крігінг-моделі та алгоритми редукції розмірності, які забезпечують баланс між точністю та обчислювальною ефективністю.

Паралельно активно розвивається напрямок дослідження вибухових навантажень, де спектр підходів варіює від аналітичних і напівемпіричних залежностей (P-I діаграми, безрозмірні критерії) до високоточних чисельних моделей FSI, здатних відтворювати складні нелінійні процеси взаємодії ударної хвилі з тонкими елементами конструкцій. Особливу увагу приділяють розробці узагальнених моделей, придатних для масштабування результатів між лабораторними випробуваннями та реальними спорудами.

Отже, аналіз сучасних публікацій дозволяє розглядати сейсмічні та вибухові навантаження не як ізольовані напрямки, а як взаємодоповнювальні сфери, де спільними є проблеми формалізації невизначеностей, побудови функцій крихкості та пошуку ефективних розрахункових моделей. Саме у цьому контексті огляд обраних джерел дає можливість виділити перспективні методологічні рішення для розвитку теорії розрахунку елементів будівельних конструкцій в умовах невизначеностей [1].

Автори запропонували повний підхід до оцінки сейсмічної крихкості в межах концепції Performance-Based Earthquake Engineering (PBEE). Методологія забезпечує можливість отримувати криві крихкості як побічний продукт процесу, що спирається на генерацію ідей та багаторівневі симуляції по створенню моделей, що максимально імітують реальні процеси.

Головна ідея - використовувати штучно згенеровані сейсмічні рухи (коли реальних записів бракує), комбінувати спрощені та детальні чисельні моделі й пов'язувати їх у єдиний інструмент через ієрархічний крігінг (просторову інтерполяцію), застосовувати глобальний аналіз чутливості для визначення параметрів, які найбільше впливають на результат.

Корисні сторони. Підхід охоплює весь цикл PBEE: від моделювання сейсмічних

рухів до отримання кривих крихкості і дає значну економію ресурсів: замість сотень важких симуляцій достатньо обмеженого набору, решту відтворюють сурогатні моделі, добре підходить у ситуаціях, коли мало даних або вони дорогі в отриманні.

Недоліки. Якість результатів дуже залежить від того, наскільки штучні рухи відображають реальні умови.

Поєднання моделей різної точності може створювати складнощі для практичного використання у стандартних розрахунках.

Цей підхід особливо корисний для випадків, коли обмежена кількість реальних сейсмічних записів або висока вартість обчислень у повних нелінійних моделях. Методика дозволяє інженерам отримувати достовірні криві крихкості з мінімальними ресурсними витратами, а також швидко оцінювати сейсмічний ризик для мостів та інших складних споруд.

Для забезпечення коректності оцінок крихкості при використанні штучних ґрунтових рухів доцільно виконувати їх валідацію за спектральними та часовими характеристиками (узгодження з PSHA, тривалість, фазові властивості), а також контроль репрезентативності набору записів для цільової локації. Це знижує ризик упередженості сурогатних моделей [2].

У цій роботі автори розвинули підхід Dimensionality Reduction–Stochastic Simulator (DR-SM). Вони зазначають: запропонований стохастичний симулятор дає змогу одночасно оцінювати корельовані інженерні параметри відгуку, що критично важливо для багатовимірної оцінки ризику.

Ідея полягає у тому, щоб спочатку зменшити складність вхідних даних (характеристики сейсмічного руху), а потім у цьому зменшеному просторі відтворювати поведінку конструкції. Це особливо корисно, коли потрібно враховувати не одну, а одразу кілька відповідей.

Корисні сторони. Метод досліджень дозволяє аналізувати корельовані реакції елементів конструкції, а не тільки окремі показники, добре працює як із реальними записами, так і з параметризованими стохастичними моделями.

Відмовляється від простих припущень (наприклад, логнормальності), що робить підхід універсальнішим.

Недоліки. Метод залишається складним у реалізації, потребує грамотного вибору «фізично мотивованих» характеристик для редукації.

Для практичних інженерів він може здатися «важким» через велику кількість статистичних кроків.

Запропонований симулятор доцільно застосовувати у випадках, коли потрібно враховувати взаємозалежні інженерні параметри (наприклад, одночасні переміщення і зусилля на різних рівнях будівлі). Це розширює можливості оцінки ризику, оскільки дозволяє моделювати комплексний відгук конструкції, а не ізольовані показники [3].

Робота присвячена використанню Gaussian Process (Kriging) для побудови непараметричних кривих крихкості. Автори підкреслюють, що просторова інтерполяція дозволяє не лише апроксимувати криву крихкості, але й кількісно описати невизначеність самої моделі.

Автори не обмежуються однією середньою кривою, вони аналізують цілі сімейства кривих (наприклад, квантильні криві), розвивають ідею глобального аналізу чутливості для самих кривих, щоб зрозуміти, які параметри найбільше впливають на невизначеність у результатах.

Корисні сторони. Метод дає змогу не тільки будувати криві, але й визначати інтервали для них, тобто явно враховувати невизначеність самого методу, визначає ключові параметри конструкції, які найбільше впливають на сейсмічну стійкість.

Результати продемонстровано на практичному прикладі трубопровідної системи атомної станції, що робить їх переконливими.

Недоліки. Метод чутливий до вибору ядра та параметрів Gaussian Process.

У складних випадках потребує багато обчислювальних ресурсів на калібрування.

Робота демонструє, як можна отримати більш реалістичні криві крихкості з урахуванням невизначеності моделі. Це

особливо важливо для об'єктів із підвищеним рівнем відповідальності (атомні станції, трубопроводи), де потрібно знати не лише ймовірність відмови, але й довірчі межі. Запропонований аналіз чутливості допомагає інженерам зосередити увагу на параметрах, які найбільше впливають на сейсмотійкість [4].

Автори зосередились на використанні стохастичних поліноміальних хаос-розкладень (SPCE) для побудови моделей крихкості. SPCE дозволяє безпосередньо працювати з параметрами стохастичної моделі ґрунтових рухів, що робить процес побудови кривих крихкості більш ефективними.

Особливість підходу в тому, що вони працюють безпосередньо з параметрами стохастичної моделі ґрунтових рухів (SGMM), які розглядаються як інтенсивності міри (ІМ). Це дозволяє швидко отримувати умовні розподіли інженерних параметрів відгуку та будувати криві крихкості без потреби у величезній кількості дорогих симуляцій.

Корисні сторони. SPCE дозволяє отримувати повний розподіл результатів, а не лише середні значення.

Метод значно швидший за класичні підходи типу Monte Carlo, дає змогу працювати з рідкісними подіями та екстремальними навантаженнями (що є найважливішим у сейсмічному аналізі).

Недоліки. Для правильної роботи потребує грамотного підбору точок для навчання моделі, у «хвостах» розподілу (рідкісні події) точність все ще може падати, тому потрібні додаткові дослідження.

Метод SPCE є ефективним інструментом для швидкого оцінювання сейсмічної крихкості у завданнях, де необхідно досліджувати багато сценаріїв або рідкісні події. Його можна використовувати в практиці оцінки ризиків, коли класичні методи Monte Carlo занадто ресурсомісткі. Підхід добре підходить для масштабних інженерних систем, таких як багатоповерхові будівлі чи інфраструктурні споруди [5].

У цій статті аналізується поведінка сталевих коробчастих конструкцій при

внутрішніх вибухах. Використання безрозмірних параметрів дає можливість передбачати режими пошкодження сталевих коробчастих конструкцій без необхідності повномасштабних випробувань. Дослідники виявили характерні режими руйнування та ввели безрозмірні параметри (наприклад, D^* , φ_q), які дозволяють узагальнювати результати та передбачати пошкодження при різних сценаріях. Це спрощує масштабування від лабораторних випробувань до реальних конструкцій.

Корисні сторони. Чітко описані механізми пошкодження конструкцій при внутрішньому вибуху.

Введення безрозмірних показників дає можливість переносити результати між моделями та реальними спорудами.

Отримані результати можуть бути використані для швидкої оцінки ризику.

Недоліки. Експерименти та моделі охоплюють лише певний діапазон навантажень і геометрії, тому їх застосування потребує додаткової перевірки для інших типів конструкцій.

Не враховано вплив складних граничних умов (наприклад, різних способів закріплення).

Запропоновані безрозмірні критерії та опис режимів руйнування можуть застосовуватись при проектуванні захищених сталевих резервуарів, коробчастих елементів та промислових конструкцій. Це дозволяє швидко оцінювати можливі наслідки внутрішнього вибуху без потреби у повномасштабних випробуваннях. [6].

Автори досліджують моментні з'єднання з великими заповненими бетоном сталевими трубами (CFT) при дії вибухового навантаження. Запропоновані пластинчасті підсилення істотно зменшують локальні деформації та підвищують загальну стійкість моментного з'єднання при вибуховому навантаженні. Для підвищення міцності застосовано пластинчасті підсилення, а поведінку конструкцій оцінювали через чисельне моделювання.

Корисні сторони. Показано, як конструктивні зміни у вузлах здатні значно

підвищити вибухостійкість. Використано критерії з військових стандартів, що робить результати практично орієнтованими, розглянуто варіанти підсилення, що дозволяє вибрати найбільш ефективні рішення.

Недоліки. Модель не охоплює складніші сценарії навантаження, наприклад, багаточисельні вибухи чи вторинні ефекти.

Результати потребують підтвердження повномасштабними експериментами.

Дослідження показує значення локальних підсилень для підвищення вибухостійкості каркасних вузлів. Результати можуть бути використані при проектуванні висотних будівель, мостів або стратегічних споруд, де вузли з'єднань є критичними елементами системи [7].

У статті розглядається поведінка залізобетонних балок високої міцності при тривалих вибухових навантаженнях. Запропоновані нормовані P-I діаграми можуть бути використані для аналізу або проектування залізобетонних балок у дальній зоні вибуху. Автори побудували нормовані P-I діаграми, які враховують дуктильність балки. Для цього вони використали поєднання експериментів у вибухових камерах та чисельного моделювання (SDOF + 3D FEM). Отримані результати дозволяють швидко прогнозувати відгук конструкцій у «дальній зоні» вибуху.

Корисні сторони. Уперше запропоновано P-I діаграми, що враховують дуктильність, тобто здатність конструкції до пластичної деформації, поєднання експериментів і моделювання робить результати достовірними.

Метод придатний для швидкого проектування та оцінки ризиків.

Недоліки. Модель зосереджена на згинальних деформаціях і не охоплює випадки, де переважають зсув чи крихкі руйнування.

Використання тривалих імпульсів обмежує пряме застосування для ближчих вибухових сценаріїв.

Побудовані P-I діаграми, що враховують дуктильність, є корисним інструментом для інженерів при оцінці поведінки залізобетонних балок у дальній зоні вибуху.

Це дозволяє швидко визначати межі безпечної роботи елементів у різних сценаріях вибухового впливу [8].

Це класичний огляд, який систематизує знання про вибухові навантаження та їх вплив на конструкції. Оцінка вибухового впливу на конструкції є складним завданням, яке потребує поєднання експериментальних, чисельних та аналітичних методів. Автори узагальнили характеристики вибухових хвиль, методи їх опису (емпіричні й аналітичні), вплив на різні типи конструкцій, базові принципи проектування проти вибухових впливів.

Корисні сторони. У статті надано фундаментальне узагальнення, яке підходить як «базова платформа» для подальших досліджень.

Розглянуто як зовнішні, так і внутрішні вибухи. Окреслено практичні напрями підвищення вибухостійкості.

Стаття є оглядовою, тому не пропонує власних експериментальних або чисельних рішень.

Огляд є базовим джерелом для науковців і практиків, які працюють з вибухостійкістю. Він забезпечує фундаментальні знання про природу вибухових хвиль і дає основу для порівняння нових методів [9].

У цій статті розглянуто поведінку тонкостінних металевих пластин під дією вибуху у двох умовах: неконфайнованого (UB) та конфайнованого (CB). У випадку неконфайнованого вибуху пластичні шарніри виникають у центрі пластини, тоді як у конфайнованому випадку вони з'являються поблизу межі й поширюються у зворотному напрямку.

Автори поєднали експериментальні випробування з цифровою кореляцією зображень (DIC) та чисельне моделювання, щоб зафіксувати механізм розвитку деформацій. Було виявлено три фази відгуку: ініціація пластичних шарнірів, їх поширення та стадія відбиття хвилі.

Корисні сторони. Вперше на експериментальному рівні детально показано різницю між UB та CB умовами.

Поєднання експерименту і моделювання забезпечує високу достовірність результатів

і дає практичні висновки для проектування елементів у суднобудуванні та промислових спорудах.

Недоліки. Розглянуто лише сталеві пластини, без композитів чи інших матеріалів.

Дослідження зосереджене на одиночному елементі, без урахування впливу складної системи.

Отримані результати дають цінну інформацію для проектування судових перегородок, корпусів технічних ємностей та інших тонкостінних елементів. Робота показує, наскільки важливими є умови навантаження, оскільки різниця між конфайнованим і відкритим вибухом радикально змінює картину деформацій [10].

Робота присвячена аналітичному прогнозуванню енергетичної відповіді напівциліндричних оболонок на дію вибухових навантажень. Запропонована аналітична модель точно відтворює динаміку енергетичної відповіді оболонки та добре узгоджується з чисельними симуляціями. Автори створили нову модель, що базується на енергетичному підході та враховує динаміку розсіювання енергії у процесі взаємодії оболонки з хвилею. Аналітичні рішення порівняли з чисельними розрахунками (LS-DYNA), що підтвердило їх високу точність.

Корисні сторони. У статті дається проста, але ефективна формула для оцінки енергетичної відповіді, підтверджено збіжність аналітичних і чисельних рішень, розглянутий підхід придатний для швидкої оцінки поведінки оболонок різної товщини.

Недоліки. Дослідження зосереджене на напівциліндричних оболонках, застосовність до інших геометрій обмежена.

Не враховує складних нелінійних ефектів пошкодження матеріалу.

Запропонована аналітична модель може застосовуватися як швидкий інструмент для попередньої оцінки вибухостійкості тонкостінних оболонок. Це актуально для інженерів, які займаються проектуванням трубчастих або оболонкових конструкцій, де потрібно швидко оцінити енергетичні втрати і потенційні механізми руйнування [11].

Автори створили програму для аналізу і пошуку оптимальних рішень (обчислювальний солвер) для FSI для задач з вибуховими навантаженнями. Він поєднує методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) з методами скінченних елементів (FEM) для опису поведінки тонких еластичних структур під дією ударних хвиль. Розроблений солвер FSI достовірно відтворює динаміку взаємодії ударних хвиль з тонкими пластинами та може застосовуватись для різноманітних вибухових навантажень. У статті наведено приклади: від лабораторних експериментів у ударних трубах до чисельного відтворення реального вибуху.

Корисні сторони. Метод дає реалістичне відтворення FSI-процесів, включно з відбиттям, дифракцією та турбулентністю, дозволяє досліджувати режими, які важко перевірити експериментально.

Дає інструмент для перевірки інших, простіших моделей.

Недоліки. Метод є дуже ресурсомістким.

Потребує детальної інформації про матеріальні параметри та геометрію для точного відтворення.

Розроблений FSI-солвер є потужним інструментом для дослідників, які вивчають нелінійні процеси взаємодії ударної хвилі з конструкцією. Його можна використовувати для перевірки спрощених моделей, а також для складних сценаріїв, де потрібна висока точність. Це робить його важливим інструментом для досліджень фундаментальних аспектів вибухостійкості.

Висновки

Огляд статей [1–11] демонструє зближення двох раніше відокремлених напрямків досліджень: сейсмічного аналізу та аналізу імпульсних (вибухових) впливів.

В процесі розв'язку задач утворилася спільна методична площина імовірнісного моделювання, багаторівневого (multi-fidelity) чисельного розрахунку та сурогатного моделювання. Сукупно це формує практичний фундамент для уточнених теорій розрахунку елементів конструкцій під дією динамічних навантажень, із фокусом на міцність і

стійкість та врахування алеторних і епістемічних невизначеностей.

Основа досліджень, що впливає з огляду має багато напрямків.

Імовірнісна постановка та функції крихкості. Роботи [1–4] переходять від детермінованих схем до ієрархії «hazard → fragility → decision» (PBEE), будуючи крихкість, як інженерний інструмент із довірчими межами та багатовимірними EDP.

Економія обчислень без втрати змісту. Multi-fidelity ієрархічний крігінг [1] поєднує спрощені та детальні моделі; SPCE [4] і DR-SM [2], дають швидкий перехід до повних (умовних) розподілів реакцій; Kriging+GSA [3] робить прозорою епістемічну складову та пріоритизацію параметрів.

Проектні «скорочені форми». У вибуховому блоці безрозмірні показники (класифікатори) пошкоджень [5], P–I діаграми з урахуванням здатності до пластичних деформацій [7] та аналітичні енергетичні моделі оболонок [10] перетворюють важке 3D-моделювання на керовані інженерні правила прийняття рішень.

Еталонна валідація. FSI-солвер [11] забезпечує «верхню полицю» точності для перевірки й калібрування спрощених підходів; експериментально-чисельні дослідження тонкостінних пластин у СВ/UB-умовах [9] та вузлів CFT [6] надають дані для перевірки моделей.

Дослідження сейсмічних дій. Коли даних мало або повний нелінійний розрахунок надто дорогий застосовуються multi-fidelity з ієрархічним крігінгом [1], для багатовимірних корельованих EDP (дрейфи поверхів, зусилля, прогини): DR-SM [2], для масового сканування сценаріїв та рідкісних подій: SPCE [4], для прозорості невизначеностей і цільового зменшення епістеміки: Kriging, GSA [3].

Дослідження імпульсних (вибухових) дій. Для швидкої оцінки режимів пошкодження й масштабування результатів між геометріями використовуються безрозмірні критерії [5], P–I діаграми як практичний інструмент попереднього проектування з урахуванням здатності до пластичних деформацій [7],

аналітичні енергетичні моделі для оболонок як інформативні «опори» до 3D-FE [10], FSI як «еталон» для складних сценаріїв [11], експерименти/число для СВ/UB-ефектів у тонкостінних елементах [9] і силових вузлах [6].

Дія рухомого навантаження. Хоча рухоме навантаження прямо не розглянуто у [1–11], запропоновані інструменти досліджень можна використати: SPCE [4] та DR-SM [2] для стохастичності збудження та багатовимірних реакцій; Kriging+GSA [3] для прозорості невизначеностей; multi-fidelity [1] для керованої вартості розрахунків.

Якщо потрібно швидко отримати достовірні криві крихкості за обмежених ресурсів використовуються методики [1; 4]; якщо ключова задача є взаємозв'язок багатьох показників стійкості (міжповерхові дрейфи, локальні деформації), то основою досліджень буде методика, що розглянута в [2]; якщо критичним є контроль епістемічної невизначеності та визначення впливових параметрів, основою буде [3].

Для проектних рішень у вибухостійкості й масштабування сценаріїв використовуються методики, що розглянуті в роботах [5; 7; 10]; для високоточних перевірок [11], для СВ/UB-ефектів у тонкостінних елементах [9]; для загальної методичної карти [8].

Ключові обмеження: залежність від якісної калібровки збудження (штучні рухи у [1]); вибір ознак у DR-SM [2]; стабільність GP у «хвостах» [3]; потреба адаптивного добору навчальних точок у SPCE [4].

Практичний алгоритм інтеграції можна розділити на етапи 1–6.

1. Опис дії (сейсміка/вибух/рухомий об'єкт) зі спектром невизначеностей.

2. Ієрархія моделей елемента (SDOF/DOF → 3D-FE → FSI для еталонів).

3. Сурогатний шар: SPCE [4] / DR-SM [2] / Kriging [3], за потреби — multi-fidelity [1].

4. Криві крихкості P–I безрозмірні критерії [5; 7; 10].

5. GSA та інтервали довіри [3].

6. Валідація експериментами/FSI [9; 11] і уточнення параметрів.

Найбільш корисні для впровадження: коли бракує даних/дорогі FE, multi-fidelity та НК [1];

для багатовимірних, корельованих реакцій (складні системи) [2];

коли прозора епістеміка та цільове зниження невизначеності [3];

при швидкому скринінгу сценаріїв/«хвостів» розподілів [4];

прикладні інструменти (безрозмірні критерії, P–I, аналітика) [5; 7; 10];

забезпечує еталонну точність і верифікацію спрощень [11]; ключ до СВ/UB-ефектів [9]; базовий методичний ландшафт [8].

Сукупність підходів [1–11] дозволяє системно поєднати стохастичну природу динамічних впливів із керованою вартістю розрахунків, надаючи як точні (FSI/3D-FE), так і оперативні (SPCE/DR-SM/Kriging, P–I, безрозмірні критерії) інструменти. Це дає практично застосовну, узгоджену основу для уточнених теорій розрахунку елементів конструкцій під сейсмічними, вибуховими та (через перенесення методів) рухомими навантаженнями з чітким відображенням міцності, стійкості та ризику відмови.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abbiati G., Broccardo M., Abdallah I., Marelli S., Paolacci F. Seismic Fragility Analysis Based on Artificial Ground Motions and Surrogate Modeling of Validated Structural Simulators. *enrXiv (Draft)*. Aarhus University, University of Trento, ETH Zurich, Roma Tre University, 2021.

2. Kim J., Wang Z. Uncertainty Quantification for Seismic Response Using Dimensionality Reduction-Based Stochastic Simulator. *Preprint submitted to Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. University of California, Berkeley, 2024.

3. Gauchy C., Feau C., Garnier J. Uncertainty Quantification and Global Sensitivity Analysis of Seismic Fragility Curves Using Kriging. *arXiv preprint*, arXiv:2210.06266, 2022.

4. Zhu X., Broccardo M. & Sudret B. Seismic fragility analysis using stochastic polynomial chaos expansions. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2023. № 72. P. 103413. URL: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103413>

5. Li L.-M., Zhang D., Yao S.-J. Damage Mode Analysis of Steel Box Structures Subjected to Internal Blast Loading. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 21. P. 10974. URL: <https://doi.org/10.3390/app122110974>
6. Shin J., Hwang S.-H., Kim J. Numerical Investigation of Blast Performance of Plate-Reinforced Moment-Resisting Connection Using Large Concrete Filled Tubular Section. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 11. P. 3700. URL: <https://doi.org/10.3390/app10113700>
7. Zhao H., Zeng F., Feng X., Wang S., Huang C., Liu N., Zhang J. Dynamic Response Analysis Method of a High-Strength RC Beam Subjected to Long-Duration Blast Loading. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 6. P. 1612. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14061612>
8. Ngo T., Mendis P., Gupta A., Ramsay J. Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview. *Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE)*. 2007. Special Issue. Pp. 76–91. URL: <https://doi.org/10.56748/ejse.671>
9. Yao S., Chen Y., Sun C., Zhao N., Wang Z., Zhang D. Dynamic Response Mechanism of Thin-Walled Plate under Confined and Unconfined Blast Loads. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, № 2. P. 224. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12020224>
10. Liu P., Xu N., Pan Z.-H. A New Analytical Prediction for Energy Responses of Hemi-Cylindrical Shells to Explosive Blast Load. *Buildings*. 2019. Vol. 9, № 7. P. 168. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings9070168>
11. Bailoor S., Annangi A., Seo J. H., Bhardwaj R. (A fluid-structure interaction solver for compressible flows with applications to blast loading on thin elastic structures). *Applied Mathematical Modelling*. 2017. № 52. Pp. 470–492. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.05.038>

REFERENCES

1. Abbiati G., Broccardo M., Abdallah I., Marelli S. and Paolacci F. Seismic Fragility Analysis Based on Artificial Ground Motions and Surrogate Modeling of Validated Structural Simulators. engrXiv (Draft). Aarhus University, University of Trento, ETH Zurich, Roma Tre University, 2021.
2. Kim J. and Wang Z. Uncertainty Quantification for Seismic Response Using Dimensionality Reduction-Based Stochastic Simulator. Preprint submitted to Earthquake Engineering and Structural Dynamics. University of California, Berkeley, 2024.
3. Gauchy C., Feau C. and Garnier J. Uncertainty Quantification and Global Sensitivity Analysis of Seismic Fragility Curves Using Kriging. arXiv preprint, arXiv:2210.06266, 2022.
4. Zhu X., Broccardo M. and Sudret B. Seismic fragility analysis using stochastic polynomial chaos expansions. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2023, no. 72, p. 103413. URL: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103413>
5. Li L.-M., Zhang D. and Yao S.-J. Damage Mode Analysis of Steel Box Structures Subjected to Internal Blast Loading. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 21, p. 10974. URL: <https://doi.org/10.3390/app122110974>
6. Shin J., Hwang S.-H. and Kim J. Numerical Investigation of Blast Performance of Plate-Reinforced Moment-Resisting Connection Using Large Concrete Filled Tubular Section. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 11, p. 3700. URL: <https://doi.org/10.3390/app10113700>
7. Zhao H., Zeng F., Feng X., Wang S., Huang C., Liu N. and Zhang J. Dynamic Response Analysis Method of a High-Strength RC Beam Subjected to Long-Duration Blast Loading. *Buildings*. 2024, vol. 14, no. 6, p. 1612. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14061612>
8. Ngo T., Mendis P., Gupta A. and Ramsay J. Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview. *Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE)*. 2007, Special Issue, pp. 76–91. URL: <https://doi.org/10.56748/ejse.671>
9. Yao S., Chen Y., Sun C., Zhao N., Wang Z. and Zhang D. Dynamic Response Mechanism of Thin-Walled Plate under Confined and Unconfined Blast Loads. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024, vol. 12, no. 2, p. 224. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12020224>
10. Liu P., Xu N. and Pan Z.-H. A New Analytical Prediction for Energy Responses of Hemi-Cylindrical Shells to Explosive Blast Load. *Buildings*. 2019, vol. 9, no. 7, p. 168. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings9070168>
11. Bailoor S., Annangi A., Seo J.H. and Bhardwaj R. A fluid-structure interaction solver for compressible flows with applications to blast loading on thin elastic structures. *Applied Mathematical Modelling*. 2017, no. 52, pp. 470–492. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.05.038>

Стаття надійшла до редакції: 01.02.2026.

УДК 72.01

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.34.1224

НА ПОЧАТКУ БУВ КУБ САТУРНА (МАЛО ВІДОМИЙ КОНТЕНТ АРХІТЕКТУРИ)

ВОРОБІЙОВ В. В.^{1*}, канд. арх., доц.,
ШИЛО О. С.², ст. виклад.

^{1*} Кафедра архітектурного проектування 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, ORCID ID: 0000-0003-1539-3196

² Кафедра архітектурного проектування 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, ORCID ID: 0000-0002-9869-5474

Анотація. Постановка проблеми. Архітектура як явище життя людини постійно змінюється як за формою, так і за змістом. Ніхто не може точно сказати, яким буде наступний стиль? Майже ніхто не може фахово пояснити, чому попередній стиль чи група стилів була такою чи іншою. Але чи це так? Гра архітектури дійсно здається непередбачуваною і незбагненою. Навіть якби її якось ні назвали. Але будь-яке ім'я – неправда. Виникає відчуття, що архітектура існує тому, що вона існує? Вона існує тут і зараз, відроджуючись у кожному новому «зараз» знову і знову в себе. Критики і теоретики архітектури, як і самі архітектори, звичайно, намагаються пояснити напрямки архітектурної творчості. Але жоден сучасний експерт не вказує (і не може вказати в принципі, що доведено квантовою теорією) на те, як архітектура проявляється з підсвідомих архетипів (а чи з них?) і як вона пов'язана з надматеріальною свідомістю. Усвідомлення таких зв'язків залишається маловивченим і майже неправильно зрозумілим аспектом професії. В результаті архітектори «не знають, що роблять». Однак нічого випадкового не буває. Будь-яке явище містить певну першооснову, первинну форму і первинний процес, які є поясненнями того, що відбувається. Матеріальна архітектура відображає нематеріальні процеси у надматеріальній свідомості. Точніше, вона народжується цією свідомістю як один із аспектів великої ілюзії матриці нашого світу, яку «морфоструктурує» (точніше, вигадує, доміслює) мозок (розум) людини. Мозок не бачить справжньої геометрії світу, а, наділений шаблонними програмами, описує його з того, що не існує, на основі того, що нібито існує. Що нібито матеріальне. В результаті світ стає феноменальним і парадоксальним, як феноменальною і парадоксальною є і сама архітектура. Мозок лише описує те, що бачить, що створене незрозумілим «програмістом». Мозок не бачить і не здогадується про існування «програміста». І «програміст» виявляється, умовно, не один. Їх як би два: надматеріальна свідомість і певна матеріальна планета, енергоінформаційний вплив якої окреслює контури, описані розумом через вібрації ключової форми. Назва цієї планети – Сатурн, а назва геометричної фігури-коду – куб. І тільки чорний. Який був добре відомий усім стародавнім культурам людства. **Мета статті** – показати місію Сатурна та пов'язаної з ним геометричної форми у вигляді Чорного Куба як головних «програмістів» архітектури на Землі. Показати, як слід розуміти роль Чорного Куба Сатурна як надцивілізаційного явища, що веде або до придушення, або до звільнення людини від ілюзії світу; розкрити невідомий сучасним архітекторам та іншим фахівцям зміст основної геометричної форми, що використовується в архітектурі та науках про суспільство та людину, званої Чорним Кубом Сатурна.

Ключові слова: чорний куб; Сатурн; архітектура; свідомість; матриця світу; ілюзія світу; шаблони розуму; знак-символ; феноменальність світу; архітектурний факультет ДІБІ

IN THE BEGINNING, THERE WAS A SATURN CUBE (LITTLE KNOWN ARCHITECTURE CONTENT)

VOROBIOV V.V.^{1*}, Cand. Sc. (Arch.), Assoc. Prof.,
SHYLO O.S.², Assist. of Prof.

^{1*} 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, ORCID ID: 0000-0003-1539-3196

² 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, ORCID ID: 0000-0002-9869-5474

Abstract. Statement of the problem. Architecture as a phenomenon in human life is constantly changing both in terms of form and content. No one can say exactly what its next style will be. Almost no one can professionally explain why the previous style or group of styles was this or that. But is it so? The game of architecture really seems unpredictable and incomprehensible. Even if it was named somehow. But any name is not the truth. There is a feeling that architecture exists because it exists? It exists here and now, reborn in each new “now” into itself again and again. Critics of architecture and theorists of architecture, as well as architects themselves, of course try to explain the directions of architectural creativity. But not a single modern expert points out how architecture manifests itself from subconscious archetypes and how it is connected with supra-material consciousness. Awareness of such connections remains a poorly studied and almost misunderstood aspect of the profession. As a result, architects “don't know what they are doing”. However, nothing happens by chance. Any phenomenon contains some primary basis, primary form and primary process, which are the starting explanations of what is happening. Material architecture reflects non-material processes in consciousness. More precisely, it is born by this consciousness as one of the aspects of the great illusion of the matrix of our world, which is morphostructured by the brain (mind) of a person. The brain does not see the true geometry of the world, but, endowed with template programs, describes it from what does not exist on the basis of what supposedly exists. Which is supposedly material. As a result, the world becomes phenomenal and paradoxical, as phenomenal and paradoxical is architecture itself. The brain only describes what it sees, created by an incomprehensible programmer. The brain does not see and does not guess about the existence of the programmer. And the programmer turns out to be, conditionally, not alone. There are two of them, as it were (?): the supra-material consciousness, and a certain material planet, the energy-informational influence of which outlines the contours described by the mind through the vibrations of the key form. The name of this planet is Saturn, and the name of the geometric shape-code is a cube. And it is only black. Which was well known to all ancient cultures of mankind. *The purpose of the article* is to show the mission of Saturn and its associated geometric shape in the form of a black cube as the main programmers of architecture on Earth. To show how one should understand the role of the Black Cube of Saturn as a supra-civilizational phenomenon leading either to the suppression or to the liberation of man from the illusion of the world; to reveal the unknown to modern architects and other specialists content of the basic geometric form used in architecture and sciences of society and man, called the black cube of Saturn.

Keywords: *black cube; Saturn; architecture; consciousness; matrix of the world; illusion of the world; templates of the mind; sign-symbol; phenomenality of the world; architectural faculty of DICEI*

Якщо Ви хочете пізнати космічні секрети в архітектурі, мисліть одиницями виміру енергії, частоти та вібрації фізичних форм. Але якщо Ви хочете пізнати їхній зв'язок з надматеріальною свідомістю, мисліть категоріями надматеріальної свідомості. Це дві різні ігри. Обидві існують одночасно, але одна впливає з іншої (В. В. Воробійов)

Великі таємниці справжніх контентів архітектури треба повернути та розкрити (В. В. Воробійов)

Ключове завдання архітектури всіх часів та народів – показати Людині шлях виходу з-під влади форми. Показати через ключову геометричну форму, що лежить у її основі – КУБ (В. В. Воробійов)

Постановка проблеми. Наш світ наповнений різними знаннями. Одні з них відомі всім. Про інших знають мало хто. А треті просто пропадають у тумані часів, не оцінені адекватно в самому моменті свого виникнення. Вини залишилися, не поміченими. Але такими, що зіграли важливу символічну роль на початку якогось процесу в соціумі. Ці знання – знаки можна

умовно вважати ПРОГРАМАМИ ДОЛІ для того явища, заради якого вони створювалися.

За товщею років навряд чи можна відновити імена фізичних-провідників та не фізичних авторів таких символів. Але важливо хоча б те, що одного разу їхнє існування хтось згадає. І, отримавши осяяння про його сенс, зможе сказати: А ВСІ ПОЧИНАЛОСЯ З ЦЬОГО ЗНАКА...

Саме собою явище алегоричних знаків - символів зараз ніким з архітекторів майже не вивчається. Причина зрозуміла: тема розпливчата, для багатьох є сумнівною, навіщо нею займатися? Що вона дає? Її вважають не науковою... Але вона більш ніж наукова. Оскільки призводить до відкриттів, які пов'язують із сучасною нейробіологією, теорією квантової свідомості, квантовою фізикою, загальною теорією відносності та іншими сучасними науковими теоріями.

Саме такі теми пов'язують людство зі світом ідей. Не дарма одна з давніх мудростей каже: СВІТОМ ПРАВЯТЬ ІДЕЇ. За всієї розпливчастості теми вона міцно вросла в ментальність кожної нації. Знаки – символи є на гербах та прапорах кожної країни. Є вони на гербах стародавніх династій, на шевронах уніформи солдатів та офіцерів військових підрозділів. На шевронах поліції... Багато на чому іншому.... ЗНАКИ-СИМВОЛИ...

Вони служать інструментом самоідентифікації. Без них історія не твориться. Вони для деяких людей стають головними символами усвідомленого життя... У певному розумінні – знаками їхньої долі...

Створення знаків відноситься до галузі явищ, в яких мало хто розуміється. Геральдисти, люди, які створюють геральдичні та інші графічні та барельєфні знаки для урядів, для банківських купюр, для інших важливих носіїв символів влади чи соціального статусу окремих історично значимих персон багато з цієї сфери знають, але майже ніколи про ці знання не пишуть. А якщо пишуть, то дуже поверхово. Без занурення у глибину. Це їхня «цехова таємниця». Може це правильно. У знаках завжди має бути таємниця. Вони не повинні читатись буквально.

Але іноді знаки створюються аж ніяк не фахівцями в галузі таємних смислів геометричних форм та різних кольорів на шкалі електромагнітного спектру. Чи не фахівцями з сакральної геометрії. Не фахівцями в галузі езотеричних символів, пов'язаних з космогонією, теологією чи іншими аспектами духовного та

матеріального світу та правилами їхньої взаємодії. Знаки створюються людьми правопівкульного типу, мислення яких пов'язане з інформацією, що зберігається в підсвідомості. Точніше, в індивідуальному та колективному підсвідомому, за Карлом Юнгом.

З інформацією, що зберігається в самому генокоді людського організму [1; 2].

Такі люди отримують ефект творчого натхнення, інсайту, будучи музикантами, художниками, поетами, архітекторами чи скульпторами. Вони не можуть пояснити, звідки до них дійшла ідея. Ніхто з них не може це пояснити. Але, отримавши її, створюють матеріальні символи, що відбивають цю ідею. Залишається загадкою, як Космос відбирає для передачі ідеї конкретних таких людей. Гіпотези, як у будь-якому явищі, з цього питання, звісно, є. Майже всі вони – у галузі досліджень психології, морфічних резонансів, езотеричних, екзотеричних та інших знань.

У літературі, присвяченій архітектурі, подібний підтекст взагалі не розкритий. Хоча саме він не матеріально первинний по відношенню до матеріально проявленої, вторинної архітектури.

Мета дослідження – розкрити невідомий тимчасовим архітекторам та іншим фахівцям контент базової геометричної форми, що використовується в архітектурі та науках про суспільство та людину, яка називається Чорним Кубом Сатурна.

Аналіз публікацій показав: про різноманітні аспекти впливу людство та її архітектуру із боку Сатурна знали у всіх відомих древніх цивілізаціях – в Месопотамії, Єгипті, Греції, Римської імперії та інших [3; 12; 13; 15]. Потім, через різні несприятливі історичні процеси ці знання були відкинуті. Однак їхні сліди збереглися до наших днів у вигляді стародавніх манускриптів та інших текстів, більша частина з яких чекає на свою адаптацію до сучасних наукових тезаурусів. Більше того, правомірність цих знань підтверджується сучасною наукою, що спирається на квантову нейробіологію, теорію взаємодії

свідомості та реальності, психологію, квантову теорію та інші напрями досліджень. Однак ці теорії поки не розкривають зв'язок з архітектурою та її первинними підтекстами (контентами), на основі яких вона колись була створена як явище в людській культурі і в людській цивілізації, продовжуючи функціонувати в наш час.

У зв'язку з цим поки що не заглиблюватимемося в суміжні галузі знань, а перейдемо до ситуації, пов'язаної з початком історії історії архітектурного факультету Дніпропетровського інженерно-будівельного інституту (ДІБІ). Історії, яка придбала в контексті заявленої теми дуже незвичайний поворот.

На початку цієї історії також був... КУБ САТУРНА!!! ВІН СТАВ ГЕНОКОДОМ І ФАКУЛЬТЕТУ І КАФЕДРИ АРХІТЕКТУРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ. КУБ З'ЯВИВСЯ НА КОРОТКИЙ ЧАС У КІНЦІ 1970 року.... РОКУ САТУРНА, ЯКЩО СЛІДУВАТИ КОСМІЧНИМ ЦИКЛАМ ЖИТТЯ ПЛАНЕТИ В ІСТОРІЇ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ, І, ОДНОЧАСНО, РОКУ СТВОРЕННЯ АРХІТЕКТУРНОГО ФАКУЛЬТЕТУ В ДІБІ

Саме того року, у скульптурній майстерні архітектурного факультету, керував якою скульптор Волков Борис Кузьмович, (по батькові вкрай рідкісне; тому всі його звали просто Борисом Кузьмичем – так звичніше) на заняттях зі скульптури – була тоді у навчальному процесі ця дисципліна, – кілька студентів зайнялися ідеєю створювати макетну, тобто поки що зменшену версію, великої скульптурної композиції, у вигляді м'язистого, майже оголеного чоловіка-атлета, з натяком на образ атланта, який підняв над собою величезний куб. Який у справжній скульптурі, у майбутньому, мав стати чорним! КУБОМ САТУРНА! Що він означає, буде описано трохи нижче. Поки ж зазначимо: це був той самий містичний випадок впливу духовних світів на хлопців, які до ладу не змогли правильно пояснити справжній зміст такого куба. Вони вигадували як пояснення будь-що, але тільки не те, що насправді потрібно побачити в цій

ситуації. Не те, що насправді заклав Всесвіт у цей знак. Скульптуру повинні були встановити на піднятим над землею «лужком», створеним перед новим тоді навчальним корпусом ДІБІ, щойно зданим в експлуатацію, збудованим за проектом першого завідувача кафедри архітектурного проектування, засновника архітектурного факультету ДІБІ, Петрова Олега Борисовича. Тепер його ім'я має вулиця, на якій стоїть цей ВНЗ.

Слід гадати, що автором ідеї справді були і студенти, і сам Б. К. Волков. Але хто першим заявив про куб, тепер визначити, схоже, не вдасться. Про це можуть сказати лише ті люди, яким зараз під 80 років. Тоді вони були студентами.

Але чи живі вони тепер, і де мешкають, питання без відповіді. Життя розкидало людей по регіонах та країнах. Ясно одне: навіть якщо ідея прийшла до голови студентів, Борис Кузьмич не міг не втручатися у творчий пошук як професіонал. Він його спрямовував, і ідею коригував і правил. Без цього задумана скульптурна композиція не могла створюватись. Від його думки та його творчого дару залежало те, на чому треба зупинитися і сказати: вийшло! Це вже те, що потрібно.

Важливим у цій ситуації є те, що саме він запалив у хлопцях вогонь інтересу до скульптурної творчості. Декілька з них потім справді стали професійними скульпторами, закінчивши ще один виш – художній. Тому роль Бориса Кузьмича у будь-якому разі у пріоритеті. Не працею він тоді в ДІБІ, ідеї з кубом не виникло б. Характер у нього був, звісно, складним. Треба було пристосуватися до цієї людини, безперечно, талановитого скульптора та художника. Талановитих студентів він поважав та підтримував. Бездарних різко відкидав і лаяв: не за свою справу взялися. Треба було його зрозуміти. Він був не лише гарним скульптором, а й прекрасним малювальником. Деякі з його малюнків – з портретами та іншими темами, лежали у папках у скульптурній майстерні. Від них віяло впевненою вишуканістю ліній, твердістю композиції, грамотним, надійним штрихом, який добре ліпив форми за

законами академізму. Та це й зрозуміло: на стадії навчання студент має освоїти класичний підхід до образотворчого мистецтва, що Б. К. Волков і демонстрував з прикладу своїх графічних робіт. А вже потім, у творчості, намагатися знайти своє авторське кредо, свій художній стиль. І свої теми для втілення.



Рис. 1. Галявина перед головним фасадом ДНБІ, розташованій в своєрідному каре, що опинився між двома – старим і новим – входами в інститут, і була б місцем розміщення скульптури «КУБ САТУРНА»

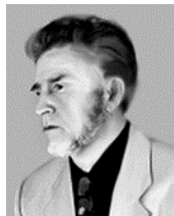


Рис. 2. Б. К. Волков – автор (співатор?) «Куба Сатурна»

НЕВЕЛИКА ДОВІДКА ПРО Б. К. ВОЛКОВА. ЯК ОСОБИСТОСТІ, ЯК ПРО ЛЮДИНУ, ЯКА ЛЕДВЕ НЕ РЕАЛІЗУВАЛА ОДНУ ІЗ ЗАГАДКОВИХ СКУЛЬПТУР У ДНІПРОПЕТРОВСЬКУ – «КУБ САТУРНА». Народився 28 червня 1932 року в селі Старосельському Смоленській області. Скульптор, графік, художник. Закінчив Харківський художній інститут (1960). Член Національної Спілки Художників України (1964). Заслужений художник України (2002). Професор (2005). Працював: старшим викладачем малюнка та скульптури Удмуртського педагогічного інституту в місті Іжевськ (1960–1970); деканом художньо-графічного факультету цього вишу (1962–1970); асистентом, старшим викладачем, доцентом, професором Дніпропетровського інженерно-будівельного інституту/ Придніпровської академії будівництва та архітектури (1971–2003). З 1950 року брав участь у республіканських та всесоюзних

художніх виставках. Основні твори: «Ноктюрн» (1967), «Юність батьків» (1971), «Батьківська шинель» (1978), «Отаман Сірко» (2001); пам'ятники – Н. Зубареву (1964), пам'ятник бойової та трудової слави в Іжевську (1967), Героям Радянського Союзу М. Н. Сташкову та Б. Кротову (1976); футболісту С. Перхуна (2005), «Професор А. Петров» (1977), «Пісня батьків», «Солдатська мелодія» (1978), «Скіфія» (1980), «Кураж» (2002). Твори Б. К. Волкова зберігаються у Дніпропетровському художньому музеї.

Нині його немає у світі живих. Кілька років тому він помер на своїй невеликій дачі, розташованій на високому березі Азовського моря в містечку під назвою Камнедробілка, що в передмісті Щолкіно, в Криму. Тому розпитати про ту історію з «КУБОМ» у нього вже неможливо. Він повинен був відливати цю скульптуру з металу в натуральну величину на одному із заводів Дніпропетровська.

Цікаво відзначити: 1. свій будиночок на дачі Б. К. Волков хотів зробити як куб; але добудувати його не встиг (автори цієї статті були там за два місяці незадовго до смерті скульптора і бачили недобудову в натурних умовах); 2. поруч із дачею скульптора Б.К.Волкова була дача іншого скульптора, з тих, хто закінчив і наш, і художній інститут; 3. слово «Камнедробілка» (що вказувала на реальний кар'єр з видобутку каменю) хіба що натякає на кам'яні скульптури; хоча сам Борис Кульмич вважав за краще у своїх скульптурах використовувати лиття. Збіги? Не думаємо... Швидше це таємна мова символів, які не можна пояснити здоровим глуздом. Які можна описати лише іншими знаннями. Як і геральдичні символи. Це не наука, але...

Студенти опинилися в цій ситуації помічниками та однодумцями Б. К. Волкова. Під керівництвом Бориса Кузьмича вони зіпили з глини кілька варіантів скульптурної композиції. Відібрана як основний варіант скульптура (відкинуті версії зруйнували) простояла в майстерні Б. К. Волкова якийсь час.

Потім її приносили в аудиторію 427, що навпроти кафедри архітектури. Яка тоді ще не була розділена на кілька малих аудиторій. Далі її сліди загубилися. Зараз деталі цієї історії згадати дуже важко. А то й взагалі неможливо. Вона мабуть, була зламана, оскільки начальство інституту не змогло її реалізувати перед входом до ДБІ. Точніше, ректор ДБІ того часу Резніченко Павло Трохимович не зміг «вибити», як тоді казали, потрібну суму грошей на створення скульптури ні в галузевому Міністерстві, ні у міськвиконкомі, ні у будівельному тресті, з яким він тоді співпрацював. Трест будував тоді нові корпуси інституту. Документальних свідчень пошуку грошей і всього іншого тепер не знайти... Тоді творчих задумів ніхто не документував. Про них дізнавалися лише за словами самих авторів робіт. Або з їхніх книг, присвячених творчості майстра. Але Борис Кузьмич Волков такої книги про свою творчість не написав, хоч і міг би. Він був учасником низки виставок творчих творів художників і скульпторів. Тому ситуація пам'ятається тільки у вигляді коротких спогадів, що відносяться до 1970 року. Документів з клопотаннями про фінансування робіт з «Кубу» ні з боку ДБІ, ні з боку міськвиконкому, ні з боку інших організацій тепер теж не знайти. Архів інституту теж довго не зберігав такі папери. Через кожні п'ять років документи, що втратили актуальність, найчастіше знищувалися. Словом, про «Куб» залишилися лише невиразні спогади. Якісь документи міськвиконкому передавалися до Державного міського архіву. Але працювати з ним тепер дуже складно. Жодних гарантій на те, що папери про фінансову діяльність тієї пори вціліли... Можливо, там і знайдеться на цю тему пара таких свідчень. Але тепер у цьому пошуку немає сенсу.

Фотографій тих глиняних версій скульптури також знайти не вдалося. Та й чи були вони? Питання не просте... Це зараз на мобільний телефон люди знімають усе поспіль. Але тоді цієї техніки не було. А фотоапарати, що знімали на рулонну целулоїдну фотоплівку (ФЕД, 36 кадрів у

катушці) хоч і були, але фотосправою займалося дуже мало людей. Примхлива це була робота – фотографування та друк фотографій. Будь-яка дрібниця перекреслювала роботу: помилка в експозиції (витримці), помилка в діафрагмі, помилка у підборі типу фотоплівки, у підборі хімічних реактивів та іншого. Майже у всіх фотолюбителів знімки виходили низькою якістю. Тільки деякі люди змогли отримати хороші відбитки... Хто зі старших поколінь свого часу цим займався, він це легко підтвердить. Тому фотографували небагато.

Швидше за все, скульптурні варіанти композиції з кубом і не фотографували. Хоча повної впевненості у цьому немає. Але поки що не вдалося знайти нікого, хто мав би ці знімки. Студенти тих років уже давно люди похилого віку, а хтось уже в світі іншому. Пошук фото із кубом майже неможливий. Особливо зараз, коли в Україні війна.

ТАК ЩО ТАКЕ КУБ САТУРНА? ЧИМ ВІН ТАК ЗНАМЕННИЙ ДЛЯ ФАКУЛЬТЕТУ? ЩО ЦЕ ЗА СИМВОЛ, НЕ НАДОВГО ВИНИКШИЙ І ШВИДКО ЗНИКШИЙ, НЕ ЗАЛИШИВ ПРО СЕБЕ СЛІДУ... ВИНИКШИЙ ЯК ТАЄМНИЧИЙ НЕ ЗРОЗУМЛИЙ НІ КИМ ОБРАЗ. НЕВІДОМИЙ НАВІТЬ САМОМУ БОРИСУ КУЗЬМИЧУ ВОЛКОВУ, – АВТОРУ І НАТХНЕНИКУ ЦЕЙ ІДЕЇ.... Бо так працює Космос.

Куб як геометрична форма, згідно з давніми трактатами, призначений для того, щоб тримати свідомість людини в полоні. Свідомість «маленького, суть ілюзорного, «я», народженого розумом, шаблонами уявлень, що створюють у своїй сукупності особистість, яка ототожнює себе зі своїм людським тілом, з історією життя в цьому тілі. У той час, як істинне «я» є справжня свідомість за межами матеріального світу. З позиції істинної свідомості маленька свідомість – суть ілюзія. Її немає. Але звичайні люди цього не розуміють. І живуть за її законами.

Куб як геометрична форма є символ, призначений на дослідження внутрішніх в'язниць людини й у пошуку виходів у стан визволення.

Куб як геометрична форма є символ, призначений на дослідження внутрішньої в'язниці людини й у пошуку виходів з неї у стан визволення.

Куб – символ приходу до істини. Зрозуміти його сенс можна лише після подолання тисячолітніх блукань людства лабіринтами несвідомого.

Куб – символ несвідомого людства, яким воно стало на тисячоліття. Тому Куб, як таємничий символ, надовго був забутий. Але його зберегли для майбутніх тисячоліть. Чорний Куб у стародавніх навчаннях пов'язаний із Сатурном. І – з чорним кольором.

Сатурн розглядається як системний «бог», як космічна енергоінформаційна матриця, зберігач часу та пан структур. Саме він пов'язаний із архітектурою. У давнину Куб сприймався як священна геометрична форма, як сакральна геометрія. Число 6 також його – це число його граней. Згідно з вченнями стародавніх мудреців, число 6 завжди пов'язане з фізичним світом. Куб зображувався чорним. І не просто. **Чорний колір нагадував про кінцеву місію куба – показ людям шляху виходу у свідомість, яка над матеріальністю фізичного світу.** У Свідомість, що ніколи не народжується і ніколи не вмирає, що представляє собою АБСОЛЮТНУ ПОРОЖНЕЧУ (ЧОРНОТУ), що містить у собі все, що стоїть над світом ілюзій.

Таким чином, чорний колір куба символізував таємницю того невидимого, що завжди вислизає від людини через те, що люди спираються на розум. Цю таємницю розумом не зрозуміти, оскільки він лише механізм опису явищ, але не інструмент їх створення. КУБ існує над релігіями, над світоглядними парадигмами. КУБ – над будь-якою вірою. До речі, Чорний Куб Кааба у Мецці символізує саме це. Символічний Небесний Єрусалим у формі куба – говорить про те саме. Є цей символ й у інших сакральних системах. Але куб – до всіх релігій, до всіх вір.

Куб – мовчазне нагадування про те, що «матерія» у в'язниці ілюзії. Сучасна квантова фізика також говорить про це: твердої

матерії немає в принципі. Це ілюзія, створена розумом як не розуміння генези ілюзії – силової взаємодії електронів один з одним, що створюють псевдовідчуття твердої речовини. Чого насправді нема. Цей самий фономен (а весь фізичний світ феноменальний) говорить і про те, що органи почуттів людини не бачать і не відчують світ у його справжньому контексті. Вони його бачать як ілюзію, вважаючи, що це справді. Що стіл у кімнаті твердий, стіни будинку та асфальт на вулиці – теж.

Автоматично виникає питання: а з чим тоді працюють архітектори? «Мода» на чорні куби на вулицях міст світу поширилася й у наш час. Як і на торгові, а також інші будівлі-паралелепіеди чорного кольору. Все це вплив ідеї Чорного Куба Сатурна.

Куб як геометрична форма належить до області архетипів (за Карлом Густавом Юнгом). Тобто він діє як сила, що впливає на поведінку людей, на їхню рефлексію. Ця ж сила формує переконання людей (включаючи архітекторів), впливає на простір та час.

Куб є символом жорстких меж існування всього.

Сатурн, як архетипічна сила і водночас, як планета в сонячній системі, розглядалася як планета випробувань.

Цикли Сатурна за законами космічних циклів, відомих в астропсихології, впливають на Землі на соціальну історію. Згідно з давніми джерелами, Сила Сатурна виховує в суспільстві відповідальність і наполегливість.

У гербі США всі елементи – це збір символів Сатурна та його куба, запозичених з декількох стародавніх систем. Наприклад, як проекції Куба як гексангона на Північному полюсі цієї планети. І орла з розкритими крилами, скопійованого з силуету чорного ворона бога Шані, який вважається найстрашнішим богом, тобто Сатурном.

У гностицизмі Сатурн – це Деміург, головний архітектор матеріального всесвіту.

Кільця Сатурна символізують замкнені кола часу, з якого людині майже неможливо вирватися. Кільця як шаблони часу

досліджуються зараз багатьма вченими у сфері альтернативної науки. Куб Сатурна – якийсь духовний контейнер, що нагадує людям, що вони – ув'язнені особливого роду, не здогадуючись про це. І з цієї в'язниці потрібно вибратися.

Куб мовчки як бі ставить кожній людині питання: чи готовий ти зштовхнутися з тією структурою, яка керує твоїми власними думками?

Стародавні мислителі виходили з того, що Сатурн як складний комплекс просторово-часових сил – жива сутність. У різних стародавніх культурах ця сила мала різні назви, у тому числі назви умовних, так званих «системних богів».

Наприклад, у Греції це був Хронос – управитель часу. Точніше – управитель кола часів. УПРАВИТЕЛЬ ЦИКЛІВ ВСЬОГО. У ТОМУ ЧИСЛІ – В ІСТОРІЇ («ЩО БУЛО, ТО І БУДЕ...») – за висловом Екклесіаста).

Хрональні потоки (темпоральні поля, поля часу) зараз вивчаються фізиками. У їхніх уявленнях хрональні потоки справді шаруваті, як кільця Сатурна.

Одночасно існують різні кола часу. Більше того, час може текти і назад. І взагалі, часу не існує. Так стверджують квантові фізики. Тому в ідеї Чорного Куба Сатурна закладено ідею ілюзії часу, в мережу якої потрапило людство. Сатурн розглядався як суворий вчитель, який не терпить компромісів. Урок має бути вивчений. А не напіввивчений, напів – ні. Навчання оплачується жорсткими обмеженнями у житті.



Рис. 3, 4. Кільця Сатурна як символи одного з ключових смислів Чорного Куба – часу, з-під влади якого людині потрібно вийти

Протяжність циклу Сатурна становить 29 років. Через кожні 29 років Сатурн переключає багато чого в житті людства.

Люди неусвідомлено резонують на його енергії та активізують відповідні рефлексії.

Тобто, образно кажучи, саме Сатурн своїми циклами програмує долі людей та соціальних процесів. 1970 – рік, коли був офіційно восени створений архітектурний факультет в ДБІ, був теж роком Сатурна.

ЕНЕРГОІНФОРМАТИКА САТУРНА ПОПЕРЕДЖИЛА І САМ ФАКТ ПОЯВИ АРХІТЕКТУРНОГО ФАКУЛЬТЕТУ В ДБІ, І ЙОГО ПРОГРАМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ. Через відповідні рефлексії людей, котрим це було важливо. Ритми Сатурна правлять рефлексіями.

Астроритмологія говорить саме про це. Її зараз розвивають та застосовують у діяльності політиків та інших категорій людей, які приймають рішення.



Рис. 5. Деякі приклади поширення образу Чорного Куба Сатурна в архітектурі урбанізованих просторів міст Миру. Є куб і у Дніпрі. Він розташований у сквері одного із лівобережних житлових районів міста.

Щоправда, цей куб не чорний і не повнотілий, а у вигляді каркаса. Але все це можна трактувати як один із аспектів Куба Сатурна. Аспект куба, що став прозорим, про що буде сказано нижче



Рис. 6. Символ Сатурна обраний і як образ призу за визначні досягнення у кінемистецтві. Наприклад, за художній фільм «Аватар», що став всесвітньо відомим. Сценаристи та режисери Джеймс Кемерон

із Семом Воррінгтоном та Зоєю Салданою виявили унікальні знання в галузі антропології, етнографії, фауни та флори у поєднанні із законами фізики та метафізики, розкрив з їх допомогою космічну місію матриці Сатурна

Прикладів про особливу роль енергій Сатурна в земній цивілізації можна наводити дуже багато. Ця ідея не настільки невідома, як здається людям, які з нею не стикалися.



Рис. 7, 8. З енергіями Сатурна пов'язана місія «Сатурна-5» – американської надважкої ракетно-носія сімейства «Сатурн». Вона використовувалася для реалізації пілотованої посадки на Місяць 20.07.1969 р., та підготовки до неї за програмою «Аполлон», а також у двоступінчастому варіанті для виведення на навколосезну орбіту орбітальної станції «Скайлеб».

Головний конструктор – Вернер фон Браун

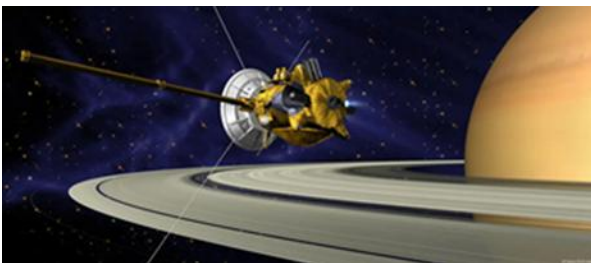


Рис. 9. А також з місією міжпланетного космічного зонда «Кассіні», відправленого США для дослідження Сатурна. Він успішно виконував свою дослідницьку програму протягом майже 20 років. Дослідження дозволили зрозуміти, які діапазони випромінювань генерують кільця Сатурна і як впливають на цикли людства. Тому, у СРСР говорити про ці відкриття заборонили

У колах фахівців ця ідея не просто відома, а відома на рівні сучасних наукових знань у найновіших галузях досліджень. Потрібно визнати, що чим далі розвиваються знання, тим більше вони підтверджують те, що було відомо тисячі років тому. По суті вони відкривають ці знання заново.

Стародавні мудреці говорили так: Куб Сатурна таїться всередині людини. Він керує

часом життя. Але ж він керує і головним: ПРОЦЕСОМ ЙОГО РОЗРИВУ. ТІЛЬКИ ТАКИЙ РОЗРИВ ДОЗВОЛЯЄ УВІТИ У ПОРОЖНЕЧУ, ЗМІСТЮЮЧУ ВСЕ І НЕ МАЮЧУ НІЧОГО. Ця порожнеча і вважається місцем проживання справжнього «Я» ЛЮДИНИ. «Я», У ЯКОГО НЕМА ПОЧАТКУ І НЕМАЄ КІНЦЯ. «Я», яке не локалізовано ні в часу, ні в просторі. «Я», ЯКЕ МІСТЬ ВСЕ ТУТ І ЗАРАЗ, У СПРАВЖНЬОМУ МОМЕНТІ. КОЖНИЙ НАСТУПНИЙ МОМЕНТ ІЛЮЗОРНОЇ ЛЮДИНИ ПЕРЕЗБИРАЄТЬСЯ ЗАНОВО. ІЛЮЗІЯ КВАНТОВАНА. ВОНА НЕ ЛІНІЙНА. І ВОНА НЕ ХВИЛЬОВА.

«Я», кожної людини, в яке потрібно вийти через подолання форми ЧОРНОГО КУБА, через проходження крізь неї, безмежно, без форми, без якостей і без назви. Об'єкти ілюзії усвідомлюються звідусіль і немає того, хто це дивиться. Тіло усвідомлюється в єдності з об'єктами. Логікою розуму такі формулювання неможливо ні уявити, не зрозуміти. Фізичний світ – це те, що з'являються усередині вас. Людина його усвідомлює, але їм не є. Двоїстість з'являється як відображення в умі. Людина – те, що вміщує у собі все. Але людини тут немає. Вона скрізь. Вона те, що не можна описати та присвоїти ім'я. Вас нема. Ви не людина. Все відбувається на екрані усвідомлення. «Я» – не тіло, але тіло – «я». Ви не зачеплені жодними подіями.

З цього приводу одна з давніх мудростей стверджує: ВИ ЗАВЖДИ БУЛИ ТИМ, КИМ НІКОЛИ НЕ НАРОДЖУВАЛИСЯ І НІКОЛИ НЕ ПОМРЕТЕ. ВИ ЗАВЖДИ БУЛИ СВІДОМОСТЮ. Вас тут нема. Ви не фізичні. Ваше тіло – ілюзія, створена розумом, але не справжніми процесами у цьому світі. Ви скрізь. Усвідомлення свого «Я» як Свідомісті, яка не тільки поза мозком, а й поза ілюзорною матерією, – це кінцева мета виходу з-під влади Чорного Куба Сатурна.

Трактати давнини попереджають: поки людина залишається у дуальності, у розділеності, вона цей постулат розумом зрозуміти не зможе. Але Сатурн ніби

закликає вийти з ментальності і стати свідомістю.

Тоді він втратить владу над людиною. АРХІТЕКТУРА на основі куба, образно кажучи, «паралелепіедна» архітектура на основі інваріантів кубів, колись створювалася саме з таким підтекстом. Як програма виконання людиною її місії свідомості.

Будинки чорного кольору у модуляції форми куба зараз у місті Дніпро теж не рідкість. Все це, згідно з положеннями сучасної квантової нейробіології, є проявами енергій Сатурна. Його програма – основа активізується на підході до завершення нового 29-річного циклу. Вона несе зміни у Світі та у соціумі всіх народів. «КУБОВАТА» АРХІТЕКТУРА – ЦЕ ГЛУБИННА ПРОГРАМА ШЛЯХУ ДО МАЙБУТНЬОЇ ЛЮДИНИ. Не важко зрозуміти, наскільки мудрішими і прозорливішими були мислителі далекого минулого.

Іншими словами, САТУРН, КУБ САТУРНА – ЦЕ СИСТЕМНА ЕНЕРГЕТИЧНА МАТРИЦЯ, ЩО УТРИМУЄ ЛЮДИНУ ВСЕРЕДИНІ ПСИХІЧНОГО ЛАБИРИНТУ. ЯКИЙ СТВОРИЛА ДЛЯ СЕБЕ САМА ЛЮДИНА. ЦЕ ТЕ, ЩО ДЕЯКІ НАЗИВАЮТЬ САТУРНІАНСЬКОЮ НІЧЮ, яка і зараз підтримує сучасний колективний сон людства.

Ця концепція поглядів передбачає, що тривимірна реальність з її жорсткими обмеженнями, з її лінійністю часу (минуле-сьогодення-майбутнє) та розділеністю форм і людей має бути змінена на концепцію Єдності. Де зникає час. Його насправді немає. Створювати архітектуру поза часом – особлива сторінка майбутнього людства.

«ЕНЕРГОІНФОРМАЦІЙНА ЄДНІСТЬ СВІТУ – НОВА ПАРАДИГМА РОЗВИТКУ ЛЮДСТВА» була темою великої міжнародної наукової конференції, що відбулася восени 1994 року на базі КБ «Південне» у Дніпропетровську. У конференції взяли участь вчені з понад сорока країн світу, у тому числі провідні фахівці із закритих науково-дослідних

організацій СРСР (як тоді говорили на сленгу-з «ящиків»). Всі вони говорили про те, що парадигму науки настав час переглянути, і показували, як це зробити в різних галузях знань. Іншими словами, вони розглядали шляхи виходу з-під влади МАТРИЦІ ЕНЕРГІЙ САТУРНА, СТРУКТУРУЮЧОГО ІЛЮЗІЮ ФІЗИЧНОГО СВІТУ НА ПРИНЦИПАХ РОЗДІЛЕНОСТІ, А ТАКОЖ ШЛЯХІВ ВИХОДУ З НЕЇ (Воробйов В. В. – учасник цієї конференції).

За концепцією єдності виникла наступна концепція – КОНЦЕПЦІЯ ЄДНОСТІ СВІДОМОСТІ І МАТЕРІЇ. 24–25 листопада 2017 року у Дніпрі на базі Університету імені Альфреда Нобеля у цьому контексті пройшла унікальна наукова конференція під назвою: «ГРАНІ ПІЗНАННЯ. ПРОСТОРНО-ЧАСОВА СУБСТАНЦІЯ СВІТОПОГЛЯДНИХ ПРЕДСТАВЛЕНЬ – ПРИСТРІЙ СВІТУ І СУСПІЛЬСТВА НА ОСНОВІ ЄДНОСТІ МАТЕРІЇ ТА СВІДОМОСТІ». (Воробйов В.В. на ній виступив з доповіддю про результати своїх досліджень на тему, пов'язану з новим розумінням архітектури та містобудування).

Конференцію організувала Міжнародна академія біоенерготехнологій.

Наступним кроком на цьому шляху має стати наукова парадигма ЄДИНОЇ СВІДОМОСТІ ЯК ДЖЕРЕЛА ІЛЮЗІЇ ФІЗИЧНОГО СВІТУ.

Сатурн не тільки вимірює існування кожної людини, а й визначає його загалом. Вчені вже отримали відповідь на питання, коли людина перериває життєвий шлях.

Ці висновки (запатентовані формули тривалості життя будь-якої людини) були отримані на основі вивчення ритмів летальних наслідків у тисяч пацієнтів військових госпіталів протягом 90-х років ХХ століття.

Таким чином, кільця Сатурна як символи кіл часу виявилися серйозним знаком. Вони обертаються безкінечно. Але вони можуть бути розірвані. Хоча запрограмовані на відкритість. Вчені визначили, яких діапазонах електромагнітного спектра

випромінюють кільця Сатурна, і на які життєві і соціальні процеси вони впливають.

У стародавніх езотеричних текстах САТУРН ВИЗНАЧАЄТЬСЯ ЯК ВЕЛИКИЙ ІМІТАТОР. ІСНУЄ ВНУТРІШНЯ САТУРНІАНСЬКА В'ЯЗНИЦЯ ДЛЯ ЛЮДИНИ, ЯКА ПОЗБАВЛЕНА СВІТЛА. Сатурн переконує кожну людину, що іншого в цьому житті отримати неможливо. Він змушує людину жити в підпорядкуванні системі постійних, нав'язаних правил.

Світ у межах куба Сатурна доступний для пізнання. І не доступний за його гранями. Архітектурний факультет ДІБІ, таким чином, незримо, виникши в 1970 році, року Сатурна, як би отримав програму, що залишається за кадром: **КУБ В АРХІТЕКТУРІ – ЦЕ КОРДОНІ ЛЮДСЬКОГО ДОСВІДУ, ЛЮДСЬКОГО ПІЗНАННЯ.**

Чорний куб – це символ прихованого, вищого, ніж відомий людський досвід, знання. І тут ми вчимо лише знанням усередині куба. Але вчимо для того, щоб пізніше Ви вийшли з обмежень куба. Матеріальний світ із цього погляду оцінюється не як ворог, а як випробування. Як екзаменатор. Чорний Куб – це наше еґо всередині нас.

Куб – це негласний символ системи контролю у суспільстві. Куб скрізь: в архітектурі, в логотипах могутніх фінансових структур та інших місцях. Саме Чорний Куб – символ матриці, що утримує під контролем усе людство. Але Куб вимагає нашого пробудження.

Поки що він – таємна в'язниця для людства. Тому архітектори і не знають, що творять. Куб створює обмеження та можливості. Куб є генератор аспектів особистих потреб у підсвідомості, аспектів, що є тінню.

По Карлу Густаву Юнґу Куб – це архетип мудрого старця-вчителя і наставника, для тих, хто це зрозумів, і тиран – для прихильників матеріальних благ, що погодилися жити в полоні. Чорний куб для таких людей – в'язниця. Він жорстко вимагає жити у межах логіки причинно-наслідкових зв'язків. Що є життя в дуальності, в розділеності.

Це розуміли і в Стародавній Месопотамії, і в Стародавньому Єгипті, і в Стародавній Фінікії, і Стародавній Греції, і в Стародавньому Римі, у всіх інших стародавніх культурах. Сутність Сатурна мала у цих цивілізаціях різні назви.

Наприклад, у Стародавньому Римі Сатурн називався Кроносом (Хроносом) – пожирачем часу. Пожирачем своїх дітей. Пожирачем всього, що існує у часі. Включно з архітектурою. Заявляючи, таким чином, що в цьому світі нічого вічного немає.

САТУРН ТАК ВЕДЕ СЕБЕ, ТОМУ ЩО ВІН ПОДВІЙНИЙ, ЯК ПОДВІЙНИЙ ІЛЮЗОРНИЙ МАТЕРІАЛЬНИЙ СВІТ. У СВОЄЙ ПОДВІЙНОСТІ ВІН МАЄ КЛЮЧІ ВИХОДУ З НЕЇ. Тобто він справді і тюремник, і вчитель.

Він – екзаменатор, що дає людині випробування та приймає за їх підсумками іспит. Через вплив енергоінформатики Сатурна кожна людина дорослішає у духовному плані. Зростаючи, вона прокидається. «Золото», яке Сатурн пропонує, це золото духовної мудрості.

Згідно з давніми вченнями, Сатурн правив ЗОЛОТИМ ВІКОМ ЛЮДСТВА (САТЪЯ ЮГОЮ), котрий тривав, за ВЕДАМИ, 1 728 000 років. (Тривалість життя кожної людини становила тоді багато тисяч років). У ньому не було війн, але не було і прогресу. ЗОЛОТИЙ ВІК – ЦЕ ВІК БЕЗДІЇ? Ні. Однак, кожен мав усе, що йому потрібне для життя в необмеженій кількості.

Сатурн виступає у ролі космічного арбітра, що вимагає від кожної людини звіту. **ФОРМИ БУДІВЕЛЬ І ПАМ'ЯТНИКІВ НА ОСНОВІ МОДУЛЯЦІЇ КУБА НЕСЛИ САМЕ ЦЕЙ ПІДТЕКСТ.** Часто повторення форми куба у сучасній архітектурі – це могутній архетип, по К. Г. Юнґу.

Куб перебуває у центрі Землі як планети у ролі першого елемента гігантського силового каркаса, як першого тіла Платона [9].

Те, що енергетика Сатурна визначає у сучасному людстві все, говорять і споруди у формі чорного куба Сатурна, встановлені в ряді сучасних міст Миру. Він є в центрі

Манхеттена (АЛАМА), він є в Мельбурні, Берліні та в інших містах на Земній кулі.

КУБ – символ влади часу, символ надійності, контролю, обґрунтованості, символ пам'яті, символ правосуддя, символ світової фінансової структури. Знання про властивості куба Сатурна врахували великі архітектори ХХ століття – Ле Корбюзьє, Френк Райт та інші.

Облік цієї теми був і в концепції сучасної архітектури, запропонованої Баухаузом (Німеччина) – організації, що стала головним генератором ідей у здчестві ХХ століття. Куб став символом архітектури ПОСТІНДУСТРІАЛЬНОГО СУСПІЛЬСТВА [6; 10]. Тобто сучасного суспільства. (Будинки – куби та паралелепіеди – хмарочоси зі скла – всюди). Як жорсткий образ, своїми вібраціями, Чорний Куб Сатурна став емблемою світових корпорацій, Кубоподібна архітектура зі скла – невидима сила ХХІ століття. Вона визначає владу панування інженерних технологій і водночас придушення людського духу. Куб – виклик кожному. СУТЬ ВИКЛИКУ – ПІДНЯТИСЯ НАД ФОРМОЮ. ПРОЙТИ КРІЗ КУБ. І ВИЙТИ З НЕГО. ПРИ ВИХОДІ З КУБА ПОВИННА ЗНИКнути ОСОБИСТІСТЬ. ВІД НЕЇ ПОТРІБНО ВІДМОВИТИСЯ. Особистість – це розум зі своєю історією життя плюс нав'язані установки поведінки, які від батьків, нашого суспільства та ілюзорного особистого досвіду. Але це не так.

Сатурн лише відбиває обмеження, які людині потрібно пройти. САТУРН – свого роду ЧОРНЕ ДЗЕРКАЛО. Мудреці минулого вчили: **кожна людина має дійти рівня, в якому він погляне в це ЧОРНЕ Дзеркало, і не побачить себе. Так як стане безпочатковим і нескінченним, всеприсутнім, що містить все. Вона буде не пов'язаною з часом і простором.**

Тобто людина згадає про своє божественне походження, яке давно забула, впав у забуття. Ставши жити в ілюзії фізичної реальності. Ця ілюзія і стала йому викликом.

Чорний КУБ САТУРНА – це прохід, портал у безначальність, це вихід із

дуальності, з розділеності. Це те, що дає нам форму, якою нас і обмежує. І з цієї точки зору вся архітектура – це символ утримання людей у владі двоїстості, у владі циклічних рухів в умовах різниці потенціалів між чимось і чимось.

Саме ця двоїстість робить ЧОРНИЙ КУБ САТУРНА загадковим та герметичним у багатьох давніх традиціях.

Подорож, яка спрямована на вихід із куба, пов'язана з фазою негрета. Або, інакше, пов'язана із символічною смертю. Це стадія, у якій треба відмовитися від зайвого.

Коли це починає розчинятися, починається вихід. Розчиняються всі вади та обмеження. І тоді людина почне виходити із ночі душі. Ночі, яка тримає людину в полоні. Геометрія в'язниці перетворюється на геометрію звільнення з цієї в'язниці.

Вся сучасна «паралелепіедна архітектура» виконана на основі модуляції енергій ЧОРНОГО КУБА САТУРНА. ВОНА ЯК БИ ПІДКРЕСЛЮЄ: ТУТ ВЛАДА КОРПОРАТИВНОГО ВСЕСВІТУ. ЕНЕРГІЇ ВЛАДИ НЕ ВІДПУСКАЮТЬ НІКОГО. Вони у всьому – в економіці, у соціальних процесах, у сім'ї, скрізь. Вони задають ритми та стандарти ілюзорного життя. У тому числі всі ДБН для проектувальників. Невидимі вони функціонують як справжні програми. Вони створюють вікно, через яке людині можна дивитись на світ і вважати його світом. Все це – варіації Куба. Чорний Куб проявляється в тих ментальних побудовах, які ми сприймаємо як очевидні, які не підлягають сумніву. Порядок, контроль, жорсткість системи це – КУБ САТУРНА. ЧОРНИЙ КУБ САТУРНА ЖИВЕ В РОЗУМІ, ЯКИЙ ЗАБУВ СВОЮ СВОБОДУ. На відміну від стародавніх людей, які свідомо шанували куб як силу, що дає свободу. Бо знали: ця сила відтворює куб всіх рівнях – фізичному, емоційному, ментальному [4; 5].

У той час, як зараз куб – це вдосконалена версія старої в'язниці. Однак не все так безнадійно. Не все втрачено. Чорний Куб багатьох пробуджує. Він – їхнє дзеркало. ГЛИБОКЕ ПРОБУДЖЕННЯ РОЗШИРЮЄТЬСЯ. ГЛИБОКА ВИСОТА

РОСТЕ. Куб живе у тих переконаннях, які люди прийняли. Чорний КУБ САТУРНА – це ПОРТАЛ ВИХОДУ.

Справжнє духовне пробудження – це не акт повстання. А процес переосмислення та зміни поглядів. За якими змінюватись і всі системи почуттів людини. Тобто справжня свобода не втеча від світу, а в зміні своєї свідомості. Точніше у виході в те справжнє «я», яке в надматеріальній свідомості. Тоді час перестає бути в'язницею. Воно перетворюється на континуальний потік. Чорний Куб стає порталом.

Чорний Куб Сатурна закликає людей зрозуміти, доказати, хто вони насправді.

ДОКАЗАТИ, ЩО МИ ГОТОВІ ВИЙТИ ЗА ЙОГО МЕЖІ. ЧОРНИЙ КУБ САТУРНА – ЦЕ ЗАПРОШЕННЯ У ТРАНСЦЕНДЕНТНІСТЬ. ЗАПРОШЕННЯ ДО ЗРОСТАННЯ, ДО ПРОБУДЖЕННЯ, ДО БІЛЬШ ВИСОКОГО СТАНУ. ЦЕ ЗАПРОШЕННЯ ДО ОТРИМАННЯ ВІДПОВІДІ НА ПИТАННЯ: ХТО МИ? ЦЕ ЗАПРОШЕННЯ ПЕРЕМОЖИТИ СЕБЕ.

ТИСЯЧІ РОКІВ МОВЧАЛИВИЙ ЧОРНИЙ КУБ САТУРНА СПОСТЕРЯГАВ ЗА ЛЮДСТВОМ: КОЛИ Ж ВОНО НАВАЖИТЬСЯ?

КУБ ВСЕРЕДИНИ КОЖНОЇ ЛЮДИНИ НАТІКАВ: ЛЮДИ МАЮТЬ УВІДОМИТИ, ЩО В'ЯЗНИЦЯ ЗАВЖДИ МАЛА ДВІРІ І КЛЮЧ ЗАВЖДИ БУЛИ У КИШЕНІ КОЖНОЇ ЛЮДИНИ.

Чорний КУБ САТУРНА – метафоричний владику часу. Нагадує (і саме це і вкладалося у скульптуру, яка могла б стояти перед головним фасадом ДІБІ/ПДАБА) про те, що МИ, АРХІТЕКТОРИ І БУДІВЕЛЬНИКИ, ПОВИННІ БУТИ УВАЖНІ ДО СТВОРЮВАНИХ МОРФОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР, ЯКІ ПОТРІБНО ЗВОДИТИ ТАК, ЩОБ НЕ БУТИ НИМИ ПОХОВАНИМИ. В алегоричному, духовному сенсі.

У концепції скульптури, що не відбулася, перед ДІБІ, атлет, що піднімає ЧОРНИЙ КУБ ВВЕРХ, ПОВИНЕН БУВ ПОКАЗАТИ Й ЙОГО ПРОЗОРНІСТЬ.

Небезпека у неусвідомленому сприйнятті форми Кубу. КУБ ДОПОМАГАЄ

ЛЮДИНІ ПРОБУДИТИСЯ. КУБ – ОБРАЗ ПОВЕРНЕННЯ ДО ВТРАЧЕНИХ ЗНАНЬ В ОБЛАСТІ ДУХУ І ЙОГО ВЗАЄМОДІЇ З МАТЕРІЄЮ.

Поки людина у владі ілюзій ЧОРНОГО КУБА САТУРНА, вона реагує на приміщення в будинках як на смертельно небезпечні зони: у прямих кутах, у центральній зоні підлоги кімнати, у діагональних смугах між протилежними кутами виникають види випромінювань, які ведуть людину до захворювань.

Часто – до невиліковних і навіть смертельно небезпечних, що ведуть до летального результату. Це перевірено і одним із авторів статті, В. В. Воробйовим. Протягом 10 років у Дніпропетровську та інших місцях проводилися госпдоговірні дослідження численних квартир у багатоповерхових житлових будинках, а також котеджів, офісних, адміністративних та інших приміщень, щодо картографування всіх вище перерахованих зон, до яких додавалися і сітки регулярних геобіологічних структур (мереж Хартмана, Пейра, Каррі та багатьох інших). На основі виявлення морфології аномальних зон у приміщеннях розроблялися інженерно-технічні системи блокування негативних випромінювань.

Іноді, дуже рідко, В. В. Воробйов натрапляв на несподівані ситуації: у приміщеннях взагалі не було аномалій будь-якого генези. Але всі вони як би «втекли» за стіни будинку і щільно накопичувалися за зовнішніми гранями стін. За всіма законами фізики цього не могло бути ніколи. Незабаром з'ясувалося: у приміщеннях жили люди, які вийшли з-під влади Сатурна. Піднялися над його вібраціями. І тепер аномальні зони, які є в кожній кімнаті, не вбивали людину, а тікали від неї. Вони не витримували його вищих вібрацій.

Якщо для звичайних людей, які перебувають у владі КУБА САТУРНА, довелося розробляти особливу теорію формоутворення будівель та споруд, яка фактом своєї геометричної форми не створювала б негативних поляризацій у внутрішньому та зовнішньому просторі

приміщень та, при цьому, розсунула б зі свого внутрішнього обсягу регулярні геобіологічні мережі, екранувала б їх, анігілювала та перепрограмувала їх, то люди за межами влади Сатурна вимагали також іншого формоутворення приміщень та будівель. Але вже на основі того, що такі форми повинні були фактом всієї присутності в просторі, незалежно від будівельних матеріалів, генерувати більш високочастотні силові структури.

У ті роки для студентів архітектурного факультету ДІБІ з метою пояснення подібних процесів був розроблений і протягом 12 років В. В. Воробйовим читався авторський курс під назвою «Біоенергоінформатика в архітектурі та містобудуванні», а для студентів – екологів – «Геопатогенні зони та біота». Іншими словами, проблема була переведена на практичні завдання в галузі архітектури та містобудування. Наразі фізичні характеристики світу стали змінюватися, і під них потрібна розробка нових рекомендацій для архітекторів.

У трактатах минулого стверджується, що ШЛЯХ ЛЮДСЬКОЇ ДУШІ ПРОХОДИТЬ ЧЕРЕЗ «ЧАС» ТА ПРОСТІР. ЯКІ ТАЄМНИЦІ ВНУТРІШНЬОГО ПРОСТОРУ КУБА САТУРНА ЇЇ ПОТРІБНО РОЗКРИТИ І ПОДОЛАТИ – головне на цьому шляху. А це не кінець. ЩО БУДЕ, КОЛИ ЛЮДИНА ВИЙДЕ ЗА МЕЖІ КУБА – тема «майбутнього» [14].

У теологічних джерелах «минулого» вказується траєкторія шляхів душі після смерті фізичного тіла. Наука цього поки що довести не може, на спроби доказу це вже існують. Шлях душі такий: після виходу з тіла вона потрапляє на Місяць, потім Меркурій, потім Венеру, далі – Сонце, Юпітер і Сатурн.

Після чого на певні зіркові системи. На кожній планеті душа проходить випробування. Випробування на Сатурні найжорстокіші. Не будемо описувати, як теологи це визначили, хоча опис був би дуже повчальним і пізнавальним, але відзначимо знову роль Сатурна. Він і в цьому аспекті – суворий суддя.

У ще давніших джерелах говориться, що маршрут душі змінюється за певними епохами... Інтрига безперечна.

Згідно з вченням древніх гностиків, що жили багато тисяч років тому, другорядний бог (неправдивий бог) Деміург створив матеріальний світ, людину та її душу, заточивши її в ЧОРНИЙ КУБ ФІЗИЧНОГО СВІТУ, спираючись на НЕВИГЛАСТВО, РОЗДІЛЕНІСТЬ.

Куб – елемент Землі, уособлення фізичної дійсності. Але ж він – відправна точка для подальшої трансформації. У глибинах психіки куб має патерни страху та нав'язаного почуття провини. РОБОТА ЛЮДИНИ З КУБОМ Є ПОЧАТОК ВНУТРІШНЬОЇ РОБОТИ З ВИХОДУ З НЬОГО. КУБ – і труна, і лялечка.

Людина має бачити існування як шлях низсходження, так і шлях підйому для КУБА (ТЕСЕРАКТУ). КУБ – це випробування перед перетворенням, тобто перед зміною фокусу уваги щодо себе як фізичної істоти щодо «я» як безпочаткової свідомості, яка не має форми, не пов'язана з часом і не має кінця.

Відповідно до цієї системи поглядів Куб є шлях від форми до духу зі здобуттям свободи. Інакше висловлюючись, Чорний Куб САТУРНА – символ глибокої духовної відповідальності.

Сатурн з погляду свого енергоінформаційного впливу – архітектор матриці нашого фізичного світу. ВІН ДІЄ ЧЕРЕЗ ЧАСТОТУ І РЕЗОНАНС.

І з цього погляду така унікальна тема сучасності, як екологічна архітектура та екологічні міста, що трактуються у нашому розумінні (у програмі «Екополіс Ірій Сад на Дніпровських порогах (2008–2020 рр.) як форми об'єктів, які виявлені енергоінформаційними епюрами конкретного географічного місця, що входять до енергоінформаційного резонансу з енергоінформаційною матрицею людини, про що заявлено в теорії трансконвертаційної триалектичної архітектури та містобудування, розробленої В. В. Воробйовим, це, як і раніше, резонанс з

Сатурном [7; 8]. Але вперше – на межі виходу із нього. А не в його середині.

У трансконвертаційній архітектурі людина стоїть на порозі виходу з КУБА САТУРНА, ВСТИГНУВ ЙОГО ПРОЙТИ ВСЕРЕДИНИ. Зробивши наступний крок, людина потрапить до архітектури, не пов'язаної з Кубом Сатурна. Космічна програма управління людством – через Сатурн.

Всі дії такої енергетики від Сатурна – через Місяць. Місяць приймає частоту Сатурна і перенаправляє ці енергії на Землю. Що, насправді, нагадує сучасні принципи бездротового зв'язку [11]. Сатурн – механізм утримання людської свідомості у певному діапазоні. Ось чому в будь-якому науковому дослідженні в галузі архітектури та містобудівництва потрібно вказати межі дослідження – типологічні, соціальні, географічні чи інші. Потрібно пройти випробування Кубом, щоб вийти у вищий діапазон буття. Куб – інструмент для самовдосконалення.

Потрібно не обійти куб, а пройти через нього, щоб звільнитися від колективного програмування, вийти в більш високочастотний діапазон. Іншими словами, **цикли Сатурна уникнути не можна. Але ці цикли можна генерувати в іншу якість.**

Як стверджують мудрі тексти минулого, КУБ САТУРНА АБО ЗРУШИТЬ ДУШУ КОНКРЕТНОНО ЛЮДИНИ, АБО ЇЇ ПРОБУДЕ ДЛЯ ВИХОДУ З СЕБЕ. Це питання особистого резонансу. Проблема в тому, що люди забули, що є щось вище форми. Куди й треба спрямувати душу. Люди живуть усередині стін Куба, поклоняючись йому. Але треба вийти на справжнє усвідомлення хибності такого життя. КУБ – це система для еволюції душі. Усередині Куба є двері із чистої, не замуненої Свідомості, що веде через цей Куб. **ВМІННЯ БУТИ НЕ В ЛІНІЙНОМУ ЧАСІ, А В СПРАВЖНЬОМУ МОМЕНТІ – ГОЛОВНА ПІДКАЗКА ДЛЯ НАБУТТЯ ВИХОДУ З КУБА.** Влада Куба почне розчинятися, як розчиняється шматочок цукру у склянці з гарячим чаєм. КУБ стане

прозорим. Звільнення від куба – це пробудження, інформація.

У західноєвропейському живописі кубізм має прямий стосунок до фракталізації світу з урахуванням форми Куба Сатурна. Точніше – завдання звільнення від куба лише на рівні підсвідомості.

Хоча у книгах з мистецтва цей момент замовчується. Говориться лише те, що немає відношення до глибинного сенсу явища. Наприклад, затверджується, що термін «кубізм» – це неологізм, придуманий поетом Максом Жакобом у червні 1907 року під час дружніх зустрічей і в суперечках про мистецтво з Пабло Пікассо, його супутницею Фернандою Олів'є, Гійомом Аполлінером та Марі Лорансе. В іншому варіанті йдеться про те, що перебіг виник випадково. У 1908 році журі Осіннього Салону в Парижі відкинуло картину Жоржа Шлюбу «Дома в Естаку». Живописець Анрі Матісс, один із членів журі, сказав, що дивна картина «написана кубиками». Критики підхопили нову назву. Вона була підтримана іншими художниками. Але знаючі люди розуміли: справа не в кубиках як таких. А у кубі Сатурна. Вони це відчували генетично. І це явище відоме кожному немовляті.

Ще з раннього дитинства дитина грає в кубики – програмує себе грати часом, але бути на ними! Бути як Творець, пам'ятаючи свою божественну природу. Чи це не головне у житті? КУБ – Ворота часу. **ВІН ЙОГО АБО ПРОПУСТИТЬ, АБО Зупинить ЙОГО ВПЛИВ НА ЛЮДИНУ.** У деякому алегоричному сенсі гра у футбол – про це ж саме. Чорний куб САТУРНА – космічне дзеркало уроків душі на ілюзорних знаннях про світ. Ми маємо перестати ототожнювати свою форму з ілюзорним «я». При такому ототожненні Чорний Куб стає гробницею. Відповідно до вчень гностиків, Деміург створює фальшиву реальність, позбавивши її божественної сутності.

До теми Сатурна належить і знаменитий «Чорний квадрат» Казимира Малевича, який наробив багато галасу у

світі знавців таємних смислів у живопису. Художник також працював у жанрі кубізму, як і фораңузи. Створивши цю роботу в творчій майстерні Київського художнього інституту в 1913 році (приміщення майстерні зараз носить ім'я цього майстра), Казимир Малевич позиціонував її як супрематизм, напрямок, що втілює перемогу Темряви над Сонцем. (за оперою М. В. Матюшина «Перемога над Сонцем»), що вписується вписується в ідею створення матеріального світу і людини в ньому Деміургом (хибним богом, як його називали древні гностики), мета якого – завжди тримати людство у колі невігластва та темряви. Уособленням Деміурга у цій концепції є Сатурн. «Чорний квадрат» – це двовимірна проекція тривимірного чорного куба Сатурна – як символ погляду на планету збоку. Планету як пастку.

Про хи́бність світу написано, наприклад, і у ВЕДАНТІ (світ – ілюзія, МАЙЯ), а також у великій кількості інших стародавніх текстів, розкиданих по континентах. В одному з таких текстів Сатурн називають ЧОРНИМ СОНЦЕМ. Він відбиває наповнення колективного несвідомого.

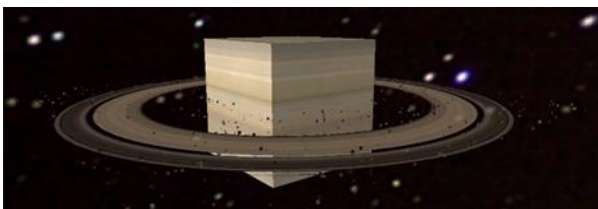


Рис. 10. Куб Сатурна для багатьох починає світлішати



Рис. 11. Пізніше «КУБ САТУРНА» стане прозорим, а потім втратить свою владу. Саме це символізує цей КУБ у Дніпрі.
Зима куба (тобто принцип холоду) закінчиться

Висновки

1. Тема, поднята у статті, лежить на межі досліджень, які входять у компетенцію сучасної науки, і досліджень, які у галузі альтернативної науки, структурно-логічний інструментарій якої виходить з принципово іншої світоглядної парадигми [11; 16]. Кожна з цих наук окремо вирішити заявлену проблему не зможе. Потрібна їхня інтеграція, що й зроблено у справжній роботі. Це дозволило дійти нижче наступних висновків.

2. КУБ ТИМЧАСОВО НАДАЄ форму безформному.

3. Рано чи пізно всі Куби повинні зникнути (як у дитинстві зникають всі іграшкові кубики). Усі форми мають повернутися до своєї Первинної Порожнечі. На це і вказувала б скульптура перед ДИСІ, яка, на жаль, залишилася нереалізованою.

Те, що залишається після зникнення куба – **нове усвідомлення людини, усвідомлення її безпочаткового я**. Коли куб зникне, яка істина чекає попереду? Це вже інша тема.

4. ЯКБИ СКУЛЬПТУРА «ЧОРНИЙ КУБ САТУРНА» була б встановлена перед фасадом тоді ще Дніпропетровського інженерно-будівельного інституту, у 1970-му році, хто знає, як би вона була сприйнята шукачами мудрості, дослідниками глибинних таємниць архітектури?

5. Є таке розуміння міста, яке тепер доведено науковими методами: кожне місто – це не лише реалізовані проекти, фізично зведені будинки та споруди. Але це й невидимі силуети об'єктів, що знаходяться в енергоінформаційному просторі, які не були реалізовані. Які були задумані різними людьми. Згідно з новими дослідженнями вчених, все, що було, є і буде як у матеріальному світі, так і на рівні мислеформ, що віддрукувалися в енергоінформаційному просторі міста, незалежно від чого, зберігаються на своїх місцях завжди. Те, що ми вважаємо минулим, сьогоднішнім та майбутнім, існує одночасно. Це розум їх поділяє. Вже вдалося створити фотоапаратуру, здатну фотографувати в тому самому місці минуле,

сьогодення та майбутнє, у тому числі – фізичні та ментальні структури – два міста одночасно. А точніше – безліч міст, оскільки світ варіативний.

По суті, наука стоїть перед новими можливостями, новим світорозумінням. Як це вже розглядалося в рамках конференцій, згаданих вище.

6. Фракталом ЧОРНОГО КУБА САТУРНА Є ПЕРШЕ З П'ЯТИ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТІЛ ПЛАТОНА, ВЛОЖЕНИХ ДРУГ У ДРУГА І УСТВОРЮЮЧИХ СИЛОВИЙ КАРКАС ВСЕРЕДИНИ НАШОЇ ПЛАНЕТИ. Створюючи таким чином, на додаток до внутрішньої в'язниці, зовнішню в'язницю.

Хоча й цю ситуацію не можна сприймати буквально. Вона повністю залежить від тієї свідомості, яка пов'язана зі згаданою вище БЕЗПОЧАТКОВОЮ ПОРОЖНІСТЮ, ЯКА Є БЕЗМОЛВНИМ СПОСТЕРЕЖНИКОМ ЗА ІЛЮЗОРНОЮ ЛЮДИНОЮ. Сам по собі розум порожній.

7. Можливо, символ ЧОРНОГО КУБА САТУРНА, якби він з'явився перед головним фасадом ДІБІ з боку вулиці архітектора

Олега Петрова, прізвище якого – від слова ПЕТРОС – камінь, став би унікальним явищем в історії не тільки інституту, а й міста.

Але поки що образ скульптури з Чорним Кубом Сатурна «захований» у невидимому звичайним зором людей енергоінформаційному діапазоні, вже є в тому самому місці, де його й хотіли матеріалізувати. Тобто **скульптура існує, але її ніхто не бачить. Такими є закони трансцендентної Свідомості.** Більше того, вона існує в незліченній кількості варіантів на галявині перед головним фасадом нашої академії. Вона існує в АБСОЛЮТНІЙ ПОРОЖНІСТІ ТА БЕЗКІНЕЧНІЙ ПОТЕНЦІЯЛЬНОСТІ СВДОМОСТІ, у квантовій заплутаності. Поки не станеться знову колапс, що виводить із квантової заплутаності конкретний варіант цієї скульптури. Можливо, її вигляд виявиться вже не таким, яким він був у Б. К. Волкова.

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 законов психики человека в системе Всеобщих Законов Мира и Общих законов человеческого общества : дис. докт. психол. наук. 2007. 244 с.
4. Бугаев А. Ф. Эниология человека. 2-е изд. 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., г. Днипро). 2019. С. 83–95.
6. Воробьев В. В., Мерилова И. А. Матрицы предопределенностей в истории архитектуры будущего. *Архитектурный вестник КНУБА*. 2018. Вып. 16. С. 360–367.
7. Воробьев В. В. Экополис. Мир звездного будущего. Книга XXI века. Днипро : Журфонд, 2020. 812 с.
8. Воробьев В. В. Город как эниокомплекс. Эниология. Одесса, 2001. С. 2–8.
9. Гончаров Н. Ф., Макаров В. А., Морозов В. С. Анализ проявлений силового каркаса Земли для изучения природных ресурсов. *Неоднородность ландшафтов и природопользование*. 1983. С. 121–133.
10. Колин Элард. Среда обитания : как архитектура влияет на наше поведение и самочувствие. 2017. 288 с.
11. К основам физического взаимодействия. *От атома к двуядерно-физическим субстанциям и живым волнам : матер. VIII междунар. науч.-практ. конф. международной академии биоэнерготехнологий 04–06 октября 2013 г. Научные труды действительных членов и членов-корреспондентов*. Под науч. ред. проф. В. А.Ткаченко. Днипро, 2013. 518 с.
12. Окорокс В. Б. Метафизика эпохи трансцендентального мышления : специфика, сущность и тенденции развития. Днепропетровск : ДНУ, 2000. 270 с.
13. *Современное миропонимание : духовные аспекты развития культуры XXI столетия : Матер. науч.-практ. конф.* Днепропетровск, Литограф, 2012. 54 с.
14. Тоффлер Э. Шок будущего. 2004. 557 с.

15. Шилов Ю. А. Мифы о «космических странниках» и календарная служба Европы – V–I тысячелетий до н. э. *На рубежах познания Вселенной. Историко-астрономические исследования*. 1992. С. 251–300.
16. Шипов Г. И. Теория физического вакуума. 1993. 382 с.

REFERENCES

1. Adamenko A.A. *Razvitiie chelovecheskogo obshchestva v XXI stoletii. K osnovam fizicheskogo vzaimodeistviia* [Development of Human Society in the 21st Century. 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]. In: *Soznanie i fizicheskaia real'nost'* [Consciousness and Physical Reality]. 1996, vol. 1, no. 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* [The Periodic System of Human Psyche Laws within the Universal Laws of the World and Human Society : doctoral dissertation in Psychology]. 2007, 244 p. (in Russian).
4. Bugaev A.F. *Eniologiya 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 otrazheni eniologicheskoi struktury sredy* [Human spatial reflections as a reflection of the enological structure of the environment]. *25 let poznaniia prostranstvenno-volnnoi 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 2019, Dnipro, 2019, pp. 83–95. (in Russian).
6. Vorobiov V.V. and Merylova I.A. *Matrytsy predopredelennosti v istorii arkhitektury budushcheho* [Matrices of predeterminations in the history of the architecture of the future]. *Arkhitekturnyi visnyk KNUBA* [Architectural Bulletin of KNUCEA]. Issue 16, Kyiv : KNUCEA, 2018, pp. 360–367. (in Russian).
7. Vorobiov V.V. *Ekopolis. Mir zvezdnogo budushcheho. Kniga XXI veka* [The World of the Starry Future. Book of the 21st Century]. Dnipro : Zhurfond, 2020, 812 p. (in Russian).
8. Vorobiov V.V. *Gorod kak eniokompleks. Eniologiya* [The City as an Eniocomplex. Eniologiya]. Odesa, 2001, pp. 2–8. (in Russian).
9. Goncharov N.F., Makarov V.A. and Morozov V.S. *Analiz proiavlenii silovogo karkasa Zemli dlia izuchenii prirodnykh resursov* [Analysis of the Earth's Force Framework Manifestations for the Study of Natural Resources]. *Neodnorodnost' landshaftov i prirodopol'zovanie* [Landscape Heterogeneity and Natural Resource Use]. 1983, pp. 121–133. (in Russian).
10. Kolin Ellard. *Sreda obitaniia: Kak arkhitektura vliiaet na nashe povedenie i samochuvstvie* [Habitat : How Architecture Affects Our Behavior and Well-Being]. 2017, 288 p. (in Russian).
11. *K osnovam fizicheskogo vzaimodeistviia* [Toward the Fundamentals of Physical Interaction]. *Ot atoma k dvuiaderno-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]. Ed. by Prof. V.A. Tkachenko. October 4–6, Dnipro, 2013, 518 p. (in Russian).
12. 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]. Dnipropetrovsk : DNU, 2000, 270 p. (in Russian).
13. *Sovremennoe miroponimanie : dukhovnye aspekty razvitiia kultury XXI stoletii : Mater. nauch.-prakt. konf.* [Contemporary Worldview : Spiritual Aspects of Cultural Development in the 21st Century : Proceedings of the Scientific-Practical Conference]. Dnipropetrovsk : Litograf, 2012, 54 p. (in Russian).
14. Toffler E. *Shok budushcheho* [Future Shock]. 2004, 557 p. (in Russian).
15. Shylov Yu.A. *Mify o "kosmicheskikh strannikakh" i kalendarnaya sluzhba Evropy – V–I tysiacheletii do n.e.* [Myths about “Cosmic Wanderers” and the Calendar Service of Europe – 5th–1st Millennia BC]. *Na rubezhakh poznaniia Vselennoi. Istoriko-astronomicheskie issledovaniia* [At the Frontiers of Universe Knowledge. Historical and Astronomical Studies]. 1992, pp. 251–300. (in Russian).
16. Shipov G.I. *Teoriia fizicheskogo vakuuma* [Theory of Physical Vacuum]. 1993, 382 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 01.03.2026.

УДК 620.9:699.86

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.52.1225

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ УТЕПЛЕННЯ У КОНТЕКСТІ СТАНДАРТУ NZEB ТА ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

КОСЕНКО Л. В., *асп., ас.*

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, e-mail: kosenko.leonid@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8841-8318

Анотація. Дослідницька робота спрямована на визначення ефективності впровадження відновлюваних джерел енергії в житлову багатоквартирну будівлю та обґрунтування технічних рішень, необхідних для приведення її до параметрів будівлі з майже нульовим споживанням енергії (NZEB).

Згідно з поставленою метою були сформувані основні задачі дослідження, а саме:

- виконати обстеження та визначити поточний стан енерговитрат будівлі за результатами інструментального енергоаудиту;
- визначити можливі варіанти впровадження ВДЕ для багатоквартирної будівлі;
- розробити заходи з термореновації будівлі, утеплення стін, перекриття для досягнення норм NZEB;
- виконати розрахунок техніко-економічних показників запропонованих заходів з термореновації.

У дослідженні проведено комплексний аналіз теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, порівняно результати розрахунків згідно з чинними будівельними нормами України та рекомендованими вимогами NZEB. Розглянуто варіанти підвищення теплоефективності зовнішніх стін, покриття і оцінено економічну доцільність впровадження кожного з цих заходів. Особливу увагу приділено порівнянню інвестиційних витрат, строків окупності та потенціалу енергозбереження при різних сценаріях утеплення будівлі. Додатково досліджено можливість інтеграції сонячної електростанції загальною потужністю 77,3 кВт та її вплив на зменшення споживання електроенергії з мережі. Проаналізовано три сценарії використання сонячної генерації: для загальнобудинкових потреб, для поєднання потреб будівлі та автономної роботи укриття, а також часткове забезпечення квартир мешканців. За результатами моделювання встановлено, що станція здатна повністю покривати загальнобудинкові потреби впродовж року, а також забезпечити автономність укриття в усі місяці, крім грудня. Отримані результати можуть бути використані проєктувальниками, енергоаудиторами та іншими фахівцями у сфері будівництва й реконструкції для підвищення енергоефективності будівель та впровадження стандартів NZEB у сучасних проєктах.

Ключові слова: енергоефективність; відновлювальні джерела енергії; утеплення; сонячна електростанція; NZEB

ASSESSMENT OF INSULATION EFFICIENCY IN THE CONTEXT OF THE NZEB STANDARD AND THE USE OF SOLAR POWER PLANTS FOR RESIDENTIAL BUILDINGS

KOSENKO L.V., *Postgrad. Stud., Ass.*

Department of Reinforced Concrete and Stone 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: kosenko.leonid@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8841-8318

Abstract. The research work is aimed at determining the effectiveness of implementing renewable energy sources in a residential apartment building and justifying the technical solutions necessary to bring it to the parameters of a nearly zero-energy building (NZEB).

In accordance with the set goal, the main objectives of the study were formulated, namely:

- to conduct a survey and determine the current state of the building's energy consumption based on the results of an instrumental energy audit;
- to identify possible options for the implementation of RES for a multi-apartment building;
- develop measures for the thermal renovation of the building, insulation of walls and floors to achieve NZEB standards;

– calculate the technical and economic indicators of the proposed thermal renovation measures.

The study conducted a comprehensive analysis of the thermal characteristics of the building envelope, comparing the results of calculations in accordance with current Ukrainian building codes and recommended NZEB requirements. Options for improving the thermal efficiency of exterior walls and roofing were considered, and the economic feasibility of implementing each of these measures was assessed. Particular attention is paid to comparing investment costs, payback periods, and energy-saving potential for different building insulation scenarios. Additionally, the possibility of integrating a solar power plant with a total capacity of 77,3 kW and its impact on reducing electricity consumption from the grid is investigated. Three scenarios for the use of solar generation were analyzed: for general building needs, for the combined needs of the building and autonomous operation of the shelter, as well as partial provision of apartments for residents. The results of the modeling showed that the station is capable of fully covering the general building needs throughout the year, as well as ensuring the autonomy of the shelter in all months except December. The results can be used by designers, energy auditors, and other specialists in the field of construction and reconstruction to improve the energy efficiency of buildings and implement NZEB standards in modern projects.

Keywords: *energy efficiency; renewable energy sources; insulation; solar power plant; NZEB*

Постановка проблеми. В умовах зростання енергоспоживання, погіршення екологічної ситуації та енергетичної безпеки України одним із пріоритетів будівельної галузі є підвищення енергоефективності будівель та впровадження концепції будівель з майже нульовим споживанням енергії (Nearly Zero Energy Buildings, NZEB), яка передбачає мінімізацію енергоспоживання та максимальне використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Житлові будинки споживають значну кількість енергії, тому інтеграція технологій відновлюваної енергетики, таких як сонячні електростанції, теплові насоси та системи рекуперації тепла є важливим кроком на шляху до досягнення цілей зеленого курсу та переходу до будівель з майже нульовим споживанням енергії (NZEB).

Аналіз публікацій. Проведений аналіз наукових публікацій і нормативних документів, що стосуються підвищення енергоефективності житлових будівель у контексті стандарту Nearly Zero Energy Building (NZEB). Усі розглянуті дослідження показують, що досягнення показників (NZEB) будівлі можливе лише за умови комплексного поєднання заходів енергозбереження [1–3].

З результатів огляду літератури основним заходом можна виділити утеплення огорожувальних конструкцій як базового заходу зменшення енергопотребителі будівлі. Підвищення теплозахисних характеристик стін, покрівлі, та світлопрозорих конструкцій забезпечує найбільший і найстабільніший ефект

зменшення тепловтрат, незалежно від типу інженерних систем, що застосовуються. Високоєфективні системи опалення, вентиляції чи кондиціонування не здатні забезпечити досягнення нормативних показників NZEB без належного рівня зовнішньої теплоізоляції оболонки будівлі [4–5].

Запровадження в Україні нових нормативних вимог щодо будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії створює правову основу для практичного впровадження рішень, орієнтованих на посилення теплоізоляції та інтеграцію сонячних електростанцій у житловому секторі. Використання відновлюваних джерел енергії є обов'язковою вимогою для будівель, що відповідають стандарту NZEB.

Зазначене підтверджує актуальність досліджень, спрямованих на оцінку ефективності утеплення саме в поєднанні з використанням ВДЕ [1–6].

Мета. Метою дослідження є визначення ефективності впровадження відновлюваних джерел енергії в житлову багатоквартирну будівлю та приведення будівлі до параметрів NZEB.

Завдання дослідження. Згідно з поставленою метою були сформувані основні задачі дослідження, а саме:

- виконати обстеження та визначити поточний стан енерговитрат будівлі за результатами інструментального енергоаудиту;

- визначити можливі варіанти впровадження ВДЕ для багатоквартирної будівлі;

- розробити заходи з термореновації будівлі, утеплення стін, перекриття для досягнення норм NZEB;

- виконати розрахунок техніко-економічних показників запропонованих заходів з термореновації.

Результати дослідження. Об'єктом дослідження є житловий багатоквартирний 5-ти поверховий будинок з неопалювальним горищем у місті Дніпро. Будівля має 113 квартир та побудована з використанням силікатної цегли, товщина стін 510 мм. Ззовні будівля утеплена локально системою лоскутного утеплення, що не забезпечує цілісного теплозахисту. На основі результатів інструментального енергетичного аудиту огорожувальної оболонки будівлі, що охоплював дослідження зовнішніх стін, перекриття над підвалом та горищного перекриття, було встановлено технічний стан конструкцій. Виявлено теплові відмови та невідповідність існуючих огорожувальних елементів чинним нормативним вимогам щодо теплового захисту. За результатами розрахунку товщини утеплення за нормами ДБН та рекомендованими нормами NZEB визначено:

- Для утеплення стін мінімально допустима товщина теплоізоляційного шару становить 150 мм для приведення параметрів огорожувальних конструкцій до рівня ДБН. Водночас для досягнення рівня енергоефективності рекомендованого стандартами NZEB мінімальна товщина утеплювача має становити 200 мм, а розрахункова 250 мм.

- Утеплення перекриття неопалювального горища рекомендована товщина утеплювача для відповідності ДБН становить не менше 250 мм. Для досягнення параметрів встановлених нормами NZEB мінімальна товщина має бути 300 мм, а розрахункове оптимальне значення 320 мм.

З отриманих результатів розрахунку товщини утеплювача за діючими нормами ДБН та нормами NZEB, різниця товщини

утеплювача збільшується на 60 % для стін та 62 % для перекриття горища, що має великий теплоізоляційний потенціал для збереження тепла при цьому отримані економічні дані порівняння термінів окупності різниці складає приблизно на 2 роки більше.

У ході проведеного дослідження було здійснено розрахунок енергоспоживання житлової будівлі за трьома сценаріями, що дозволило оцінити вплив різних варіантів термореновації на її енергетичні характеристики.

Аналіз першого сценарію, який відображає поточний стан будівлі без виконання утеплення зовнішніх стін та перекриття горища, показав, що річна енергопотреба становить 774 144 кВт·год, що відповідає класу енергоефективності «Е» та свідчить про значні теплові втрати через огорожувальні конструкції.

Другий сценарій передбачав виконання утеплення згідно з чинними будівельними нормами України. Розрахунки показали, що при застосуванні фасадної теплоізоляції товщиною 150 мм для стін та утеплення горищного перекриття шаром 250 мм коефіцієнти теплопередачі огорожувальних конструкцій знижуються до нормативних значень ($U = 0,25 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ для стін та $U = 0,2 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ для перекриття). Це дозволяє зменшити річну енергопотребу до 691 200 кВт·год, що відповідає економії 10,7 % порівняно з вихідним станом.

Третій сценарій був розрахований відповідно до підвищених вимог стандартів будівель з майже нульовим споживанням енергії (NZEB). При товщині теплоізоляції 250 мм для стін ($U = 0,18 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$) та 320 мм для перекриття ($U = 0,12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$) річне енергоспоживання становить 656 640 кВт·год, що забезпечує зниження енергопотреби на 15,2 % порівняно з базовим станом та на додаткові 5 % порівняно з другим сценарієм [6].

Таким чином, виконання термомодернізації відповідно до ДБН забезпечує суттєве підвищення енергоефективності при відносно помірних витратах, тоді як реалізація вимог NZEB дозволяє досягти максимальної економії

енергії, проте потребує більших фінансових інвестицій [5–9].

Окрім теплоізоляційних заходів, було здійснено моделювання роботи сонячної електростанції потужністю 77,3 кВт,

встановленої на покрівлі будівлі площею 515 м² [10].

Результати моделювання сонячної електростанції та виробництво енергії показано на рисунку 1.

Місяць	Сонячне випромінювання (кВт·год / м ² / день)	Енергія змінного струму (кВт·год)
Січень	1.16	2,371
Лютий	2.18	4,024
Березень	2.91	5,808
Квітень	4.77	8,787
Травень	6.29	11,583
Червень	6.93	11,934
Липень	6.72	11,927
Серпень	6.42	11,357
Вересень	4.80	8,638
Жовтень	2.60	4,940
Листопад	1.07	2,010
Грудень	0.74	1,467
За рік	3.88	84,846

Рис. 1. Результати моделювання

За результатами розрахунків очікуваний річний виробіток електроенергії становить 84 846 кВт·год за рік, що дозволяє повністю забезпечити загальнобудинкові потреби, автономну роботу укриття або частково покривати споживання електроенергії у квартирах мешканців. Найвищі обсяги генерації припадають на літні місяці (понад 11 тис. кВт·год на місяць), тоді як у зимовий період (грудень – січень) показники знижуються до 2,5 тис. кВт·год.

За результатами отриманих очікуваних значень генерації електроенергії СЕС, було проведено техніко-економічний аналіз доцільності використання сонячної електростанції в житловій будівлі.

Розглянуто три варіанти застосування виробленої електроенергії залежно від цільового навантаження та потенціалу генерації.

Забезпечення загальнобудинкових потреб (освітлення сходів і коридорів, освітлення біля під'їздів, домофона система, водяний насос) за рахунок електроенергії отриманої від сонячної електростанції, результати показано на рисунку 2.

Варіант комбінованого забезпечення електроенергією загальнобудинкових потреб та автономної роботи укриття в разі відключення централізованого живлення, результати показано на рисунку 3.

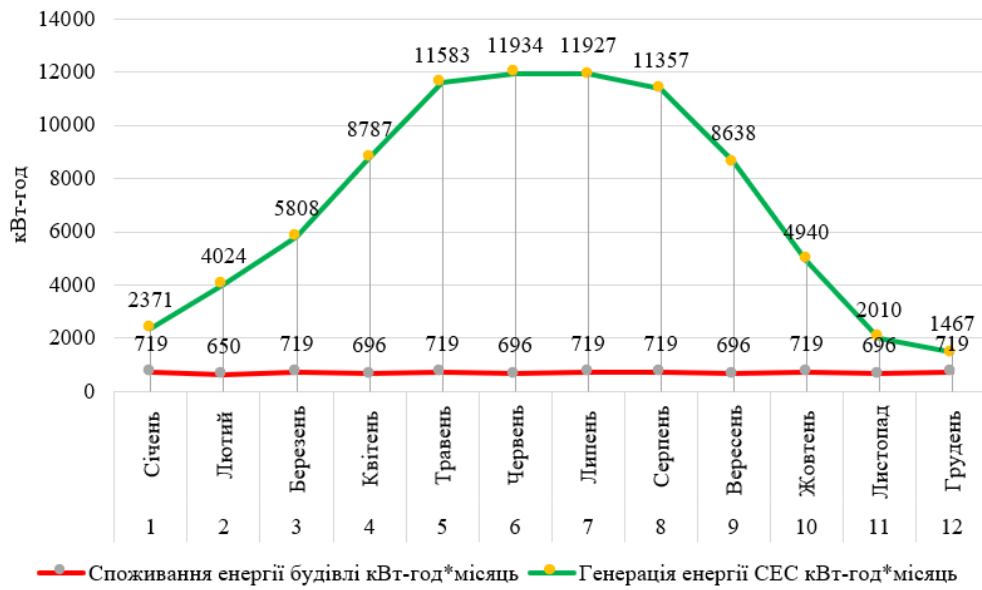


Рис. 2. Використання енергії від сонячної електростанції на загально-будинкові потреби будівлі

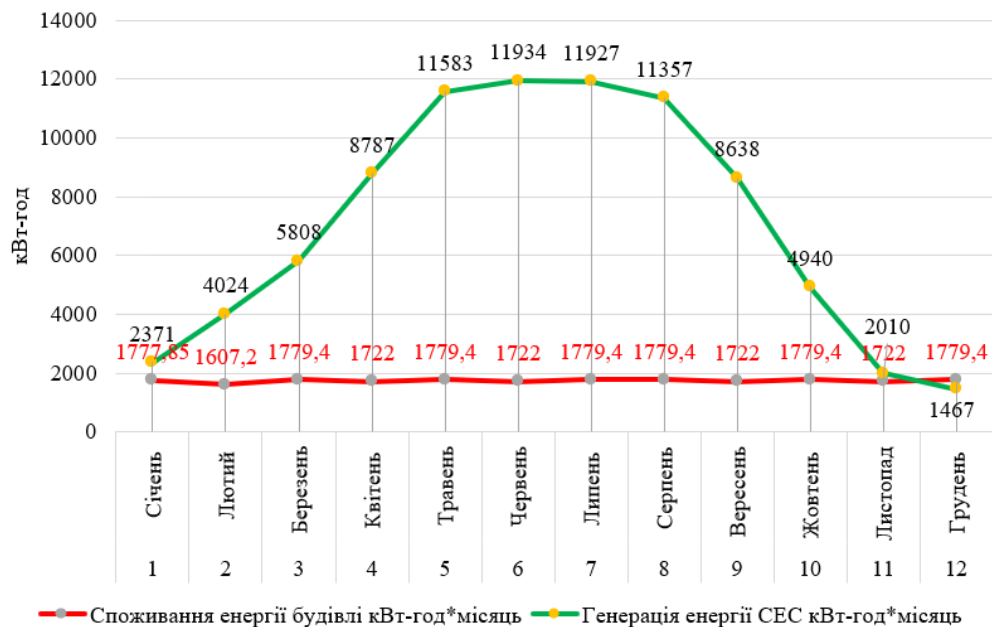


Рис. 3. Використання енергії від сонячної електростанції для загально-будинкових потреб та автономної роботи укриття

Визначено, що встановлена фотоелектрична система здатна повністю забезпечити загально будинкові потреби будівлі протягом усього року.

У разі поєднання навантаження на загальнобудинкові потреби та енергозабезпечення укриття в автономному режимі, сонячна електростанція також показує високу ефективність, забезпечуючи повне покриття енергоспоживання у всі місяці, за винятком грудня, коли

спостерігається незначний дефіцит виробленої електроенергії.

Варіант часткового покриття електроспоживання тільки квартир мешканців без укриття та загальнобудинкових потреб, результати показано на рисунку 4 та при реалізації варіанту комбінованого використання (загальнобудинкові потреби, автономне укриття, квартири) показано на рисунку 5.

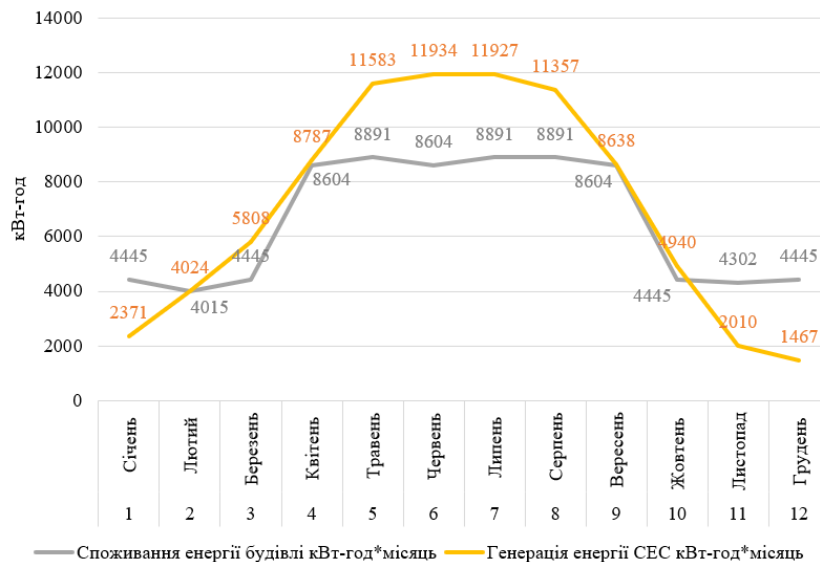


Рис. 4. Використання енергії від сонячної електростанції тільки для квартир мешканців будівлі

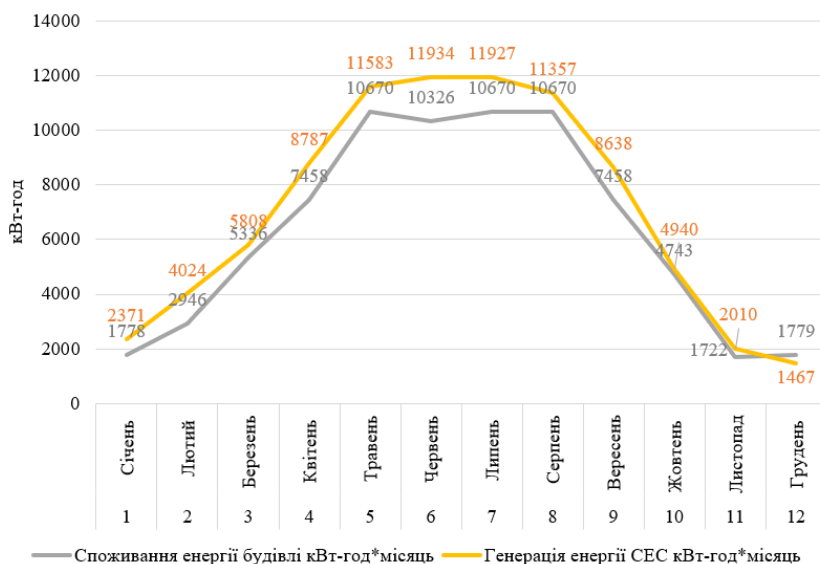


Рис. 5. Використання енергії від сонячної електростанції при комбінованому варіанті разом з квартирами мешканців будівлі

При розгляді третього сценарію, за якого енергія сонячної електростанції не спрямовується на загальнобудинкові потреби та автономне укриття, встановлено, що протягом семи місяців з квітня по жовтень можливо повністю забезпечити електроспоживання квартир у двох під'їздах будівлі (30 квартир). У періоди із зниженою генерацією (січень, лютий, березень, листопад і грудень) система спроможна покривати частково потреби одного під'їзду (до 15 квартир).

Крім того при реалізації варіанту комбінованого використання (загальнобудинкові потреби та автономне

укриття), результати показано на рисунку 5 залишкова електроенергія також може бути спрямована на забезпечення квартир: від 5 квартир у холодний період до 30 квартир у теплі місяці року в межах двох під'їздів.

Оскільки ми отримали результати порівняння утеплення (стін та перекриття горища) за діючими нормами в Україні та нормами NZEB, було розраховано впровадження комплексних заходів з утеплення огорожувальних конструкцій та використання сонячної станції на даху будівлі, вартість впровадження для кожного заходу окремо та разом показано на рисунку 6.

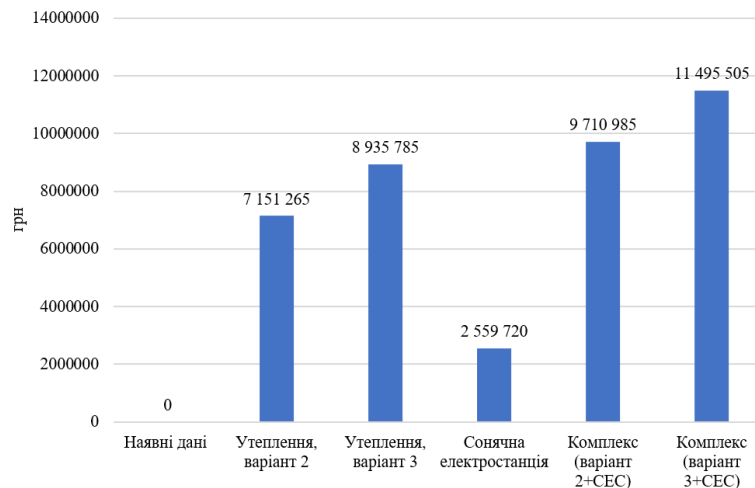


Рис. 6. Вартість заходів з термомодернізації

Економічна оцінка показала, що найбільш вигідним рішенням є встановлення сонячної електростанції з терміном окупності 7 років, а також комплексний підхід до термомодернізації, що включає утеплення та встановлення сонячної електростанції, забезпечує найкращі показники енергоефективності (зниження енергоспоживання до 26 %) та прийнятний термін окупності 17–20 років. Тоді як тільки впровадження заходів з утеплення мають дуже великий термін окупності більше 50 років.

У довгостроковій перспективі з урахуванням прогнозованого зростання тарифів на енергоносії розглянуті заходи з комплексної термомодернізації та встановлення СЕС є економічно доцільними. Різниця у терміні окупності між комплексним варіантами 2 і 3 є несуттєвою (~1 рік), що може обґрунтувати вибір більш енергоефективного варіанту 3.

При обмеженому фінансуванні рекомендується поетапне впровадження заходів з термомодернізації, починаючи з встановлення сонячної електростанції як найбільш рентабельного заходу, з подальшим утепленням огорожувальних конструкцій.

Впровадження запропонованих заходів термомодернізації дозволить значно

підвищити енергоефективність будівлі та знизити витрати на енергоносії.

Впровадження вимоги NZEB поелементно для зовнішніх стін та перекриття неопального горища виявилось економічно менш привабливим через значну фінансову складову, проте забезпечує найвищий рівень енергоефективності будівництва в довгостроковій перспективі.

Висновки

Проведене дослідження довело, що впровадження теплоізоляційних заходів за стандартами NZEB та впровадженням сонячної електростанції є ефективним шляхом термомодернізації у житлових будівлях. Розроблені рішення відповідають сучасним нормативним вимогам та забезпечують зниження енергоспоживання, покращення теплового комфорту і підвищення енергетичної незалежності. Практичне значення роботи полягає у можливості використання представленої методики у проектуванні та реконструкції житлових об'єктів, а також у підготовці фахівців у сфері енергоефективності. Отримані результати можуть бути корисними для використання при модернізації схожих об'єктів житлового фонду України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rehman H., Heimonen I., Vainio T., Ramesh R., Wallin A. Technical recommendations of the new built Nearly Zero Energy Building (NZEB) in Ukraine. Dissemination seminar. Access date: 16 October 2023.

2. Косенко Л., Коваль О., Юрченко Є., Коваль А. Аналіз європейських нормативних вимог до будівель з близьким до нульового енергоспоживанням та можливості впровадження в Україні. 2023. DOI: 10.32347/2409-2606.2023.47.28-35.
3. Демидов Олександр, Косенко Леонід, Коваль Олена, Юрченко Євгеній. Дослідження та моделювання офісного приміщення. 2024. DOI: 10.32347/2409-2606.2024.49.7-15.
4. Косенко Л. В., Коваль О. О., Юрченко Є. Л., Тимошенко О. А. Енергоефективність системи опалення висотного корпусу ПДАБА. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.66.912.
5. Наказ № 168. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії. 2025р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25#Text>
6. Лук'яненко О. Відновлювальні джерела енергії в житловому будівництві за стандартом NZEB : кваліфікаційна випускова робота студента ступеня магістра спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія за освітньою програмою ОНП «Енергоаудит та енергоефективність в будівництві». 2025.
7. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинні від 2022–01–31]. Мінбуд України. Київ : Укрархбудінформ, 2022. 23 с. (Державні будівельні норми України).
8. ДСТУ 9191:2022. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2023–03–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 63 с. (Національний стандарт України).
9. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. [Чинний від 2023–03–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 71 с. (Національний стандарт України).
10. Калькулятор PVWATTS – калькулятор для розрахунку сонячних. URL: <https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>

REFERENCES

1. Rehman H., Heimonen I., Vainio T., Ramesh R. and Wallin A. Technical recommendations of the new built Nearly Zero Energy Building (NZEB) in Ukraine. Dissemination seminar. Access date: 16 October 2023.
2. Leonid Kosenko, Olena Koval, Evhenii Yurchenko and Artem Koval. *Analiz yevropeys'kykh normatyvnykh vymoh do budivel' z blyz'kym do nul'ovoho enerhospozhyvannyam ta mozhlyvosti vprovadzhennya v Ukrayini* [Analysis of European regulatory requirements for near to zero energy consumption buildings and the possibility of implementation in Ukraine]. 2023. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.47.28-35> (in Ukrainian).
3. Oleksandr Demydov, Leonid Kosenko, Olena Koval and Evhenii Yurchenko. *Doslidzhennya ta modelyuvannya ofisnoho prymishchennya* [Research and simulation of an office lighting]. 2024. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.49.7-15> (in Ukrainian).
4. Kosenko L.V., Koval O.O., Yurchenko Y.L. and Tymoshenko O.A. *Enerhoefektyvnist' systemy opalennya vysotnoho korpusu PDABA* [Energy efficiency of the heating system of the PSACEA high-rise building]. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.66.912. (in Ukrainian).
5. *Nakaz № 168. Deyaki pytannya zaprovadzhennya vymoh do budivel' z blyz'kym do nul'ovoho rivnem spozhyvannya enerhiyi* [Order No. 168. Issues regarding the introduction of requirements for buildings with nearly zero energy consumption]. 2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25#Text> (in Ukrainian).
6. Lukianenko Oleksandr *Vidnovlyuval'ni dzherela enerhiyi v zhytlovomu budivnytstvi za standartom NZEB : kvalifikatsiyna vypuskova robota studenta stupenya mahistra spetsial'nosti 192 – Budivnytstvo ta tsyvil'na inzheneriya za osvith'nyu prohramoyu ONP “Enerhoaudyt ta enerhoefektyvnist' v budivnytstvi”* [Project topic : Renewable Energy Sources in Residential Construction According to the NZEB : Master’s thesis by a student in the Master’s program in Specialization 192 “Construction and Civil Engineering” under the educational program “Energy Audit and Energy Efficiency in Construction”]. 2025. (in Ukrainian).
7. *DBN V.2.6-31:2021. Teplova izolyatsiya ta enerhoefektyvnist' budivel'* [DBN V.2.6- 31:2021. Teplova izolyatsiia ta enerhoefektyvnist' budivel']. [Valid from 2022–01–31]. Ministry of Construction of Ukraine. Kyiv : Ukrarchbudinform, 2022, 23 p. (State Building Standards of Ukraine). (in Ukrainian).
8. *DSTU 9191:2022. Metody vyboru teploizolyatsiynoho materialu dlya uteplennya budivel'* [DSTU 9191:2022. Teploizolyatsiia budivel. Metod vyboru teploizolyatsiynoho materialu dlia uteplennya budivel']. [Valid from 2023–03–01]. Kyiv : State Enterprise “UkrNDNTs”, 2023, 63 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
9. *DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist' budivel'. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannya pid chas opalennya, okholodzhennya, ventylyatsiyi, osvithlennya ta haryachoho vodopostachannya* [DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply]. [Valid from 2023–03–01]. Kyiv: State Enterprise “UkrNDNTs”, 2023, 71 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
10. *Kal'kulyator PVWATTS – kal'kulyator dlya rozrakhunku sonyachnykh* [PVWATTS calculator – calculator for calculating solar energy]. URL: <https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.02.2026.

УДК 504.6:502.175

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.60.1226

АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ КРАКОВА ЯК ФАКТОР ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТА

КОСЬОР Л.¹, *магістр*,
КАЛДА Г.^{2,3}, *докт. техн. наук, проф.*,
ПЕТРУХА-УРБАНІК К.⁴, *докт. техн. наук, проф.*,
РИБАЛКА К.^{5*}, *канд. техн. наук, доц.*,
СОКОЛАН Ю.⁶, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра водопостачання та водовідведення, Жешувська політехніка, вул. Повстанців Варшави, 12, 35-959, Жешув, Польща, тел. +48-794-203-939, e-mail: kaldagal@prz.edu.pl, ORCID ID: 0009-0008-5262-4575

² Кафедра водопостачання та водовідведення, Жешувська політехніка, вул. Повстанців Варшави, 12, 35-959, Жешув, Польща, тел. +48-662-690-618, e-mail: kaldagal@prz.edu.pl, ORCID ID: 0000-0002-5142-0473

³ Кафедра будівництва та цивільної безпеки, Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, 29016, Хмельницький, Україна, тел. +38 (097) 478-59-86, e-mail: kalda.galina@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6309-7661

⁴ Кафедра водопостачання та водовідведення, Жешувська політехніка, вул. Повстанців Варшави, 12, 35-959, Жешув, Польща, тел. +48-663-144-913, e-mail: kaldagal@prz.edu.pl, ORCID ID: 0000-0003-1160-9009

^{5*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної 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) 905-51-42, e-mail: ekaterina.rybalka1980@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7049-6871

⁶ Кафедра будівництва та цивільної безпеки, Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, 29016, Хмельницький, Україна, тел. +38 (068) 202-16-17, e-mail: sokolan.julia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0273-5719

Анотація. *Постановка проблеми.* У статті розглядається проблема забруднення повітря Кракова такими речовинами, як зважені тверді частинки (PM₁₀, PM_{2,5}), оксиди азоту (NO_x), оксиди сірки (SO_x) і бенз(а)пірен, які мають серйозні наслідки як для здоров'я людини, так і для всієї екосистеми. Також проведено аналіз забруднення повітря від джерел шуму. Аналіз даних про якість повітря та рівень шуму дозволить зрозуміти масштаб проблеми та визначити ключові фактори, що впливають на забруднення навколишнього середовища. **Метою роботи** є визначення джерел викидів забруднюючих речовин у повітря та проведення порівняльного аналізу обсягів цих викидів у Кракові у 2019-2024 роках. **Висновок.** Використано методику тестування забруднення повітря хімічними речовинами з різних джерел та методику розрахунку шуму як одного із видів забруднення навколишнього середовища. Наведено результати досліджень забруднення атмосферного повітря від таких основних джерел, як автомобільний і залізничний транспорт, комунально-побутовий сектор, точкові джерела, відвали та шахти, а також джерела транспортного, міського та промислового шуму. Найбільшу загрозу становлять викиди з автомобільного транспорту, який також є основним джерелом шумового забруднення повітря. Основними джерелами викидів з комунально-побутового сектору є низько ефективне побутове обладнання, котельні, поганий технічний стан їх та спалювання неякісного палива та побутових відходів. Основними джерелами викидів точкового сектору є великі промислові об'єкти ТЕЦ, теплоцентралі, котельні, сміттєспалювальні заводи, а також нафтопереробні, сталеливарні, цементні заводи, хімічна та переробна промисловість. З метою зменшення викидів з побутових котелень проводять термомодернізацію будівель та заміну джерел тепла на більш екологічні. Важливим елементом є скорочення викидів від точкових джерел шляхом впровадження сучасних рішень, таких як циклони, рукавні фільтри, електрофільтри та каталітичні нейтралізатори. Заміна автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння на електромобілі значно зменшить викиди від транспорту та покращить акустичний клімат міста.

Ключові слова: забруднення повітря; навколишнє середовище; транспорт; комунально-побутовий сектор; шум; земляні роботи; точкові джерела

ANALYSIS OF AIR POLLUTION IN KRAKOV AS A FACTOR OF THE CITY'S ECOLOGICAL SAFETY

KOSIOR L.¹, *Master*,
KALDA G.^{2,3}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
PIETRUCHA-URBANIK K.⁴, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
RYBALKA K.^{5*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

SOKOLAN Yu.⁶, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Water Supply and Sewage Systems, Rzeszow University of Technology, 12, al. Powstancow Warszawy, 35-959, Rzeszow, Poland, tel. +48-794-203-939, e-mail: kaldagal@prz.edu.pl, ORCID ID: 0009-0008-5262-4575

² Department of Water Supply and Sewage Systems, Rzeszow University of Technology, 12, al. Powstancow Warszawy, 35-959, Rzeszow, Poland, tel. +48-662-690-618, e-mail: kaldagal@prz.edu.pl, ORCID ID: 0000-0002-5142-0473

³ Department of Construction and Civil Security, Khmelnytskyi National University, 11, Instytutaska str., Khmelnytskyi, 29016, Ukraine, tel. +38 (097) 478-59-86, e-mail: kalda.galina@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6309-7661

⁴ Department of Water Supply and Sewage Systems, Rzeszow University of Technology, 12, al. Powstancow Warszawy, 35-959, Rzeszow, Poland, tel. +48-663-144-913, e-mail: kaldagal@prz.edu.pl, ORCID ID: 0000-0003-1160-9009

^{5*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic 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) 905-51-42, e-mail: ekaterina.rybalka1980@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7049-6871

⁶ Department of Construction and Civil Security, Khmelnytskyi National University, 11, Instytutaska Str., Khmelnytskyi, 29016, Ukraine, tel. +38 (068) 202-16-17, e-mail: sokolan.julia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0273-5719

Abstract. Statement of the problem. The article discusses the issue of air pollution in a city located in the Małopolskie Voivodeship caused by substances such as particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}), nitrogen oxides (NO_x), sulfur oxides (SO_x), and benzo(a)pyrene, which have serious consequences for both human health and the entire ecosystem. An analysis of air pollution from noise sources was also conducted. The analysis of data concerning air quality and noise levels makes it possible to understand the scale of the problem and identify the key factors affecting environmental pollution. **Objective.** The aim of the study is to determine the sources of air pollutant emissions and to conduct a comparative analysis of their magnitude in a city in the Małopolskie Voivodeship in the years 2019–2024. **Conclusion.** The methodology applied included the examination of air pollution caused by chemical substances originating from various sources and the calculation of noise as one of the types of environmental pollution. The study presents the results of air pollution analyses from major sources such as road and rail transport, the municipal and residential sector, point sources, heaps and excavations, as well as noise sources of transport, municipal, and industrial origin. The greatest threat is posed by emissions from road transport, which is also the main source of noise pollution. The main sources of emissions in the municipal and residential sector are low-efficiency household devices, boiler installations, improper operation, poor technical condition, and the combustion of low-quality fuels and municipal waste. The main emission sources in the point sector include large industrial facilities, combined heat and power plants, heating plants, boiler houses, waste incineration plants, as well as refineries, steelworks, cement plants, and the chemical and processing industries. To reduce emissions, it is necessary to continue combating low emissions from household boiler rooms through building thermal modernization and replacing heat sources with more ecological ones. Another important measure is to limit emissions from point sources by implementing modern technologies such as cyclones, bag filters, electrostatic precipitators, and catalysts. Replacing combustion vehicles with electric ones would significantly reduce transport-related emissions and improve the city's acoustic climate.

Keywords: *pollution of the air; environment; transport; municipal and residential sector; noise; excavations; point sources*

Постановка проблеми. Забруднення повітря є однією з найсерйозніших екологічних загроз, з якими стикається сучасний світ, негативні наслідки якого впливають не лише на природу, а й на людей. Зростаюча кількість населення нашої планети піддається шкідливому впливу хімічних речовин, пилу та газів. Протягом останніх десятиліть інтенсивна урбанізація, промисловий розвиток та транспорт сприяли значному погіршенню якості повітря в багатьох регіонах і у багатьох країнах. До цього додалися ще проблеми, пов'язані із забрудненням повітря від щоденних числених вибухів у війні в Україні. У статті ми розглянемо основні джерела забруднення повітряного середовища одного із

найбільших міст Польщі – Кракова, якими є вихлопні гази автомобілів, промисловість та спалювання палива у домогосподарствах. Такі речовини, як тверді частинки (PM₁₀, PM_{2,5}), оксиди азоту (NO_x), оксиди сірки (SO_x) та бензо(а)пірен, потрапляючи в атмосферу, мають шкідливий вплив як для здоров'я людини, так і для всієї екосистеми. Тривале знаходження шкідливих речовин в атмосфері може призвести до розвитку чисельних серйозних захворювань, що вражають дихальну та серцево-судинну системи. Тверді частинки PM_{2,5} особливо небезпечні, оскільки вони можуть проникати в найглибші частини легень, збільшуючи ризик запалення та хронічних захворювань легень, таких як астма та хронічна

обструктивна хвороба легень. Крім того, забруднене повітря сприяє розвитку серцевих захворювань, інсульту та раку, зокрема раку легень. Дослідження показують, що тривалий вплив забруднення повітря також може сприяти розвитку нейродегенеративних розладів, таких як деменція та хвороба Альцгеймера. Групи ризику, до яких відносяться діти, люди похилого віку, вагітні жінки та люди з хронічними респіраторними або серцевими захворюваннями, особливо вразливі до негативного впливу забруднення повітря. У дітей, які швидко розвиваються, забруднення повітря може впливати на ріст легень і збільшувати ризик астми та інших респіраторних проблем. У людей похилого віку з ослабленою імунною системою та зниженою функцією дихання наслідки можуть бути більш серйозними, що призводить до погіршення якості життя та збільшення кількості госпіталізацій і смертей [1–4].

У відповідь на зростаючу загрозу забруднення повітря багато країн, включаючи Польщу, запроваджують правила, спрямовані на скорочення викидів, інвестування у відновлювані джерела енергії та сприяння розвитку транспорту з низьким рівнем викидів. Багато великих міст, в тому числі Краків, стикаються із серйозними проблемами якості повітря та шуму, що негативно впливає на здоров'я їхніх мешканців. У цій статті детально розглянуто основні джерела забруднення повітря Кракова. Аналіз даних про якість повітря та рівень шуму дозволить нам зрозуміти масштаб проблеми та визначити ключові фактори, що впливають на забруднення навколишнього середовища.

Аналіз публікацій. Повітря навколишнього середовища забруднюється газоподібними, твердими або рідкими речовинами, що присутні в повітрі у кількостях, що перевищують їх середньодопустимий вміст. Забруднене повітря – це повітря, хімічний склад якого може негативно впливати на здоров'я людей, тварин і рослин, а також на інші компоненти навколишнього середовища, такі як вода та

грунт. Забруднення повітря є найбільш шкідливим із усіх забруднювачів, оскільки повітряні забруднювачі є рухливими, швидко переміщуються і можуть за короткий проміжок часу забруднити великі території. Такі забруднювачі поділяються на пил та газу [1; 5–7].

Види забруднювачів у вигляді пилу – то:

1. Тверді частинки PM10 – це суміш зважених частинок діаметром менше 10 мкм. Речовини, які можуть бути присутніми у твердих частинках PM10 та вважаються забруднювачами повітря – це свинець (Pb), кадмій (Cd) - важкі метали; миш'як (As), нікель (Ni) - токсичні елементи.

2. Бензо(а)пірен (B(a)P) – хімічна сполука, канцероген.

3. PM2,5 – тверді частинки діаметром менше 2,5 мкм.

4. Органічні тверді частинки – біологічні частинки, розсіяні у повітрі або іншій газовій фазі.

5. Тверді частинки мінерального походження, що різняться за розміром та хімічним складом.

6. Дрібні металеві частинки.

Типи газоподібних забруднювачів:

1. Діоксид сірки (SO₂) – безбарвний газ з різким, їдким та задушливим запахом, що сильно подразнює дихальні шляхи.

2. Чадний газ (CO) – газ без запаху, кольору, смаку, високотоксичний, щільність якого подібна до щільності повітря.

3. Діоксид азоту (NO₂) – проміжний продукт у промисловому синтезі азотної кислоти.

4. Бензол (C₆H₆) – органічна хімічна сполука з групи миш'яку.

5. Озон (O₃) – алотропна форма кисню [8; 9].

Існує три основні джерела викидів забруднювачів атмосфери:

1. Точкові джерела – переважно великі промислові підприємства, що викидають пил, оксид азоту, діоксид сірки, чадний газ та важкі метали.

2. Поверхневі (дифузні) – котельні, домашні печі та невеликі промислові підприємства, що викидають переважно пил та діоксид сірки.

3. Лінійні – переважно забруднення від транспорту, що викидає оксиди азоту, оксиди вуглецю, ароматичні вуглеводи та важкі метали [10].

У Польщі найбільшою проблемою є забруднення повітря твердими частинками PM10 та PM2,5 і бензо(а)піреном. Найважливішими джерелами цих забруднювачів є промисловість, автомобільний транспорт, енергетичний сектор та вихлопні гази від котлів на твердому паливі та від печей у домогосподарствах [9].

До причин поганої якості повітря у Польщі належать, наприклад, відсутність просторового планування, що забезпечує сталий розвиток міст; розвиток транспорту, що базується на великій і постійно зростаючій кількості автомобілів; розвиток коридорів повітрообміну (зелених зон); висока ціна на газ; застарілі системи опалення; спалювання відходів; низька

екологічна свідомість суспільства та високе споживання енергії.

Забруднення повітря в містах є серйозною проблемою з наслідками для довкілля та здоров'я людини. Моніторинг якості повітря має вирішальне значення для контролю забруднення, прийняття політичних рішень та впровадження екологічних норм [2; 11].

Метою цієї статті є визначення джерел викидів забруднюючих речовин у повітря та аналіз обсягів цих викидів у Кракові у 2019–2024 роках.

Виклад основного матеріалу.

Джерела забруднення повітря у Кракові.

Забруднення повітря автомобільним транспортом. У таблиці 1 представлені результати вимірювань викидів забруднюючих речовин у повітря автомобільним транспортом у 2019, 2020 та 2024 роках.

Таблиця 1

Зведена інформація про хімічні викиди від автомобільного транспорту в Кракові

Назва та код зони	Площа поверхні, [км ²]	Календарний рік	Тип забруднюючої речовини	Кількість викидів, [кг/рік]
Краківська агломерація PL1201	327	2024	Викиди SO _x	16 159
		2020		4 096
		2019		3 897
		2024	Викиди NO _x	2 279 331
		2020		1 912 030
		2019		1 971 206
		2024	Викиди PM10	273 213
		2020		129 371
		2019		131 227
		2024	Викиди PM2,5	150 274
		2020		97 484
		2019		102 868
2024	Викиди B(a)P	3,3		
2020		1,9		
2019		1,9		

Аналізуючи значення, представлені в таблиці 1, впливає, що у 2019–2024 роках спостерігалось збільшення викидів усіх протестованих забруднювачів повітря від автомобільного транспорту. Зниження рівня забруднення у 2020 році було спричинене локдауном, запровадженим унаслідок пандемії коронавірусу (SARS-CoV-2). Викиди оксидів сірки, азоту, твердих частинок PM10 та PM2,5, а також

бензо(а)пірену збільшуються через постійно зростаючу кількість транспортних засобів на дорогах та їх неналежне обслуговування та ремонт. Дослідження показують, що кількість автомобілів на вулицях Кракова щороку збільшується, а їхній середній вік продовжує зростати. Дизельні автомобілі, що не відповідають стандарту Євро-5, та бензинові автомобілі, що не відповідають стандарту Євро-3, становлять найбільшу

частку викидів від автомобільного транспорту. Зростання кількості кур'єрських компаній також сприяло збільшенню викидів. Зросла кількість комерційних транспортних засобів, які викидають більше забруднюючих речовин, ніж легкові автомобілі. Влада Кракова вжила заходів щодо покращення якості повітря, а саме запровадила «Зони чистого транспорту» та зміни в управлінні дорожнім рухом. Розширення дорожньої інфраструктури призвело до тимчасових перебоїв у русі, що спричинило додаткове забруднення середовища міста. Затори на дорогах мали значний вплив на збільшення забруднення

повітря. У методі оцінки викидів від сектору автомобільного транспорту, який було використано у 2024 році, запровадили відмінності порівняно з тими, що були використанні у попередні роки. Ці зміни зумовлені модифікаціями та вдосконаленням методології оцінки викидів, що був запропонований Інститутом охорони навколишнього середовища.

Забруднення повітря комунально-побутовими секторами. У таблиці 2 представлені результати вимірювань викидів забруднюючих речовин у повітря комунально-побутовими секторами у 2019, 2020 та 2024 роках.

Таблиця 2

Зведена інформація про хімічні викиди комунально-побутовими секторами Кракова

Назва та код зони	Площа поверхні, [км ²]	Календарний рік	Тип забруднюючої речовини	Кількість викидів, [кг/рік]
Краківська агломерація PL1201	327	2024	Викиди SO _x	41 115
		2020		20 082
		2019		442 210
		2024	Викиди NO _x	268 614
		2020		290 832
		2019		286 226
		2024	Викиди PM10	66 342
		2020		40 834
		2019		574 890
		2024	Викиди PM2,5	57 520
		2020		40 047
		2019		564 923
2024	Викиди B(a)P	26,7		
2020		20,2		
2019		272,1		

Аналіз значень, наведених у таблиці 2, показує зменшення викидів оксидів сірки, азоту, твердих частинок PM10 та PM2,5, а також бензо(а)пірену з комунально-побутового сектору. Рівні всіх цих забруднюючих речовин у 2024 році нижчі, ніж у 2019. Протягом опалювального сезону комунально-житловий сектор несе основну відповідальність за забруднення повітряного середовища Кракова. Із зростанням населення міста частка опалення викопним паливом, як джерела забруднення, неухильно зростала. Наразі це є домінантним джерелом тепла на протязі зимових місяців. Тепер у Кракові діє повна заборона на використання твердого палива для опалення, тому основні

джерела забруднення такого типу тепер розташовані за межами міста.

Зниження концентрацій забруднюючих речовин відбулося завдяки впровадженню програм, що підтримують заміну вугільних печей на більш екологічні джерела опалення. Збільшилась кількість будівель, що проходять термомодернізацію, включаючи заміну вікон, покращення ізоляції будівель, встановлення енергозберігаючих систем та відновлювальних джерел енергії. Наразі спостерігається зменшення попиту на енергію для опалення, що призвело до зменшення викидів.

Аналізуючи викиди забруднюючих речовин у повітря від комунально-побутових секторів Кракова, помітне зниження у

2020 році також пов'язане із епідемією коронавірусу (SARS-CoV-2). Внаслідок соціальної ізоляції економічна активність знизилась, що призвело до збільшення кількості людей, які працювали дистанційно. А це призвело до зменшення попиту на енергію в офісних будівлях. Значна кількість підприємств припинила свою діяльність, що призвело до безробіття і до зниження достатку населення, що в свою чергу призвело до зниження витрат на опалення будинків та до зменшення викидів у навколишнє середовище [12].

Метод, що використовувався для оцінки якості повітря у 2024 році, змінився порівняно з попередніми роками завдяки модифікаціям, впровадженим Інститутом охорони навколишнього середовища. Нововведення пов'язане із врахуванням

викидів при нагріванні гарячої води для побутових потреб, яке розраховується на основі очікуваної кількості домогосподарств у певній будівлі. Це значення залежить від типу будівлі та її площі. При проведенні аналізу використовувались дані про коефіцієнти викидів та частки палива аналогічно визначенню викидів, пов'язаних із опаленням будівель. Крім того, коефіцієнти викидів були оновлені, приділяючи особливу увагу змінам бензо(а)пірену від спалювання вугілля та деревини.

Забруднення повітря від точкових джерел. У таблиці 3 представлені результати вимірювань викидів забруднюючих речовин у повітря навколишнього середовища міста Краків від точкових джерел за 2019, 2020 та 2024 роки.

Таблиця 3

Зведена інформація про хімічні викиди з точкових джерел у Кракові

Назва та код зони	Площа поверхні, [км ²]	Календарний рік	Тип забруднюючої речовини	Кількість викидів, [кг/рік]
Краківська агломерація PL1201	327	2024	Викиди SO _x	808 691
		2020		1 523 180
		2019		2 910 517
		2024	Викиди NO _x	1 723 195
		2020		2 399 394
		2019		3 810 346
		2024	Викиди PM ₁₀	145 259
		2020		219 358
		2019		260 117
		2024	Викиди PM _{2,5}	70 137
		2020		169 851
		2019		203 078
		2024	Викиди B(a)P	14,7
		2020		13,1
		2019		8,2

З таблиці 3 видно зменшення викидів оксидів сірки, азоту, PM₁₀ та PM_{2,5}. Зменшення цих речовин відбулось завдяки посиленню норм щодо промислових викидів та модернізації промислових установок. На сьогодні промислові підприємства адаптувались щодо більш суворих екологічних стандартів. Багато компаній вирішили модернізувати своє енергетичне та технологічне обладнання. Підприємства інвестували в технології, що дозволяють використовувати сонячну, вітрову енергетику та енергію біомаси.

Збільшення викидів бенз(а)пірену пов'язане із спалюванням твердого палива у сусідніх муніципалітетах [1; 5; 10]. І хоча існує заборона щодо використання твердого палива у Кракові, забруднюючі речовини мігрують до міста з навколишніх територій і тим самим збільшують забруднення повітря міста, особливо під час опалювального сезону.

До основних підприємств, що викидають речовини у повітряне середовище, відносяться: PGE Energia Ciepła Oddział 1, TAMEH Polska (виробництво енергетичних

носіїв), Holcim Polska S.A. (виробництво будівельних матеріалів), завод Alfa Laval (виробництво обладнання для відцентрової сепарації), ArcelorMittal Poland S.A. (виробництво сталі), Краківський технологічний парк [11].

Забруднення повітря з відвалів та шахт. У таблиці 4 представлені результати вимірювань викидів забруднюючих речовин у повітря з відвалів та шахт у 2019, 2020 та 2024 роках.

Таблиця 4

Зведена інформація про хімічні викиди з відвалів та шахт у Кракові

Назва та код зони	Площа поверхні, [км ²]	Календарний рік	Тип забруднюючої речовини	Кількість викидів, [кг/рік]
Краківська агломерація PL1201	327	2024	Викиди PM10	215
		2020		7 586
		2019		92 280
		2024	Викиди PM2,5	156
		2020		1 820
		2019		22 142

З таблиці 4 видно зменшення викидів твердих частинок PM10 та PM2,5 між 2019 та 2024 роками. На зменшення викидів забруднюючих речовин з відвалів та шахт вплинуло запровадження правових норм щодо управління відходами гірничодобувної промисловості та моніторингу їхнього впливу на навколишнє середовище. Були впроваджені інноваційні технологічні рішення. Наприклад, трансформовані території на колишньому вапняковому кар'єрі. Частина території була затоплена водою, що призвело до появи Залеви Закшувека, де на місці видобутку вугілля зараз розташована зелена зона навкруги штучної водойми. Район Копець Ванда перетворився на зелену зону, а території колишніх піщаних та гравійних кар'єрів перетворені на пішохідні та велосипедні доріжки. У 2024 році було проведено польові дослідження у рамках проекту під назвою «Розробка параметризації викидів пилу із звалищ та котлованів на основі результатів вимірювань та математичного моделювання – Пілотний проект» з метою пов'язати вторинні викиди пилу PM10 та PM2,5 зі звалищ та котлованів із швидкістю вітру та площею, яку займає даний об'єкт.

Шумове забруднення повітря. Шум у Кракові є серйозною проблемою. Він впливає негативно на багатьох мешканців, особливо у районах, прилеглих до основних транспортних артерій. Найбільшим джерелом шуму у місті є шум від великої

кількості легкових автомобілів та міського транспорту, який у багатьох районах міста перевищує допустимі норми [13; 14]. Дані досліджень показують, що понад 20 тисяч мешканців проживають у районах, що знаходяться у надмірному дорожньому шумі. Рівень шумового забруднення в районах навколо доріг залежить від багатьох факторів, таких як схеми руху, тип дороги, а також стан і тип дорожнього покриття. Топографія також відіграє значну роль. Крім того, на рівень шуму впливають види землекористування, тип будівель, розташованих поблизу доріг, а також методи забудови. Дорожня мережа Кракова включає національні та регіональні дороги. Через місто також проходить швидкісна автомагістраль. У межах міста Краків налічується 36,3 км національних доріг, 26,3 км регіональних доріг, 265,6 км районних доріг та 782,0 км муніципальних доріг. Значним фактором, що впливає на акустичний клімат міста, є дороги, по яким курсують важкі транспортні засоби. Слід зазначити, що все таки більша частина транспортного руху поглинається об'їзною дорогою Кракова [15].

Основними джерелами залізничного шуму є, перш за все, під'їзні шляхи та залізничні станції. Краків є важливим залізничним вузлом, що з'єднує регіони, міста та внутрішні пункти призначення. На рівень шумового забруднення залізниці впливають структура руху, тип колії та її

стан. Більша частка вантажних поїздів у структурі руху посилює негативний вплив залізничних колій на акустичний клімат міста. У Кракові є два головних вокзали: Головний залізничний вокзал і вокзал Краків Плашув. Залізничні колії проходять в адміністративних межах міста. Сполучення, які мають найбільший вплив на акустичний клімат міста, це: Краків Головний – Домброва Гурнича, Краків Плашув – Освенцім, Краків Головний – Варшава Західна та Краків Головний – Медика [16; 17].

Краків також є важливим економічним центром, де зосереджена значна частина промисловості Малопольщі. Разом із сусідніми містами, такими як Бохня, Скавіна, Мисленіце та Величка, він утворює Краківський промисловий район. У регіоні переважають сталеливарна та електротехнічна промисловість. Хімічна промисловість, включаючи фармацевтичну та газову промисловість, також відіграє значну роль. У самому Кракові розташована велика кількість промислових та комерційних об'єктів. Великі промислові зони зосереджені в районах Нова Гута та в Чижинах. Ці промислові заклади працюють цілодобово, що суттєво впливає на місцевий акустичний клімат. Багато інших заводів розташовані переважно в центральній та південній частинах міста. У місті також розташована велика кількість торгових центрів з великими парковками поблизу. Ці місця, крім забруднення атмосфери вихлопними газами, також створюють шум, особливо вдень і ввечері.

Основним джерелом шуму від літаків є робота міжнародного аеропорту Краків-Баліце імені Яна Павла II, розташованого в 11 км на захід від центру Кракова у містечку Баліце. Це досить потужний аеропорт, який став набагато більшим по кількості авіарейсів за останні майже 4 роки. Це пов'язано з тим, то пасажиропотік значно зріс після закриття аеропортів України з початку війни. Найгучнішим житловим районом є район Борковська, де вимірвальні прилади фіксують рівень шуму навіть більше 70 дБ. А біля Національного

музею рівень шуму не буває нижче 74–75 дБ [18–20].

Інші джерела забруднення повітря. Проблема забруднення атмосферного повітря у Кракові тісно пов'язана з його географічним розташуванням та метеорологічними характеристиками міста. Краків розташований у долині, розділений навпіл річкою Вісла, що в поєднанні з унікальним рельєфом значно перешкоджає природній вентиляції повітря як у вертикальному, так і в горизонтальному вимірі. Гори Татри та міжгірський Карпатський басейн розташовані лише за 100 км на південь від міста, що сприяє виникненню сильних теплих вітрів на території міста [15–17]. Це також погіршує хімічний склад атмосферного повітря.

Іншим джерелом є викиди, пов'язані з хімічними реакціями, каталітичними процесами та певними видами при виплавці металів, які не підпадають під стандартні промислові категорії. До цієї ж групи також належать викиди від залізничного та повітряного транспорту. Слід також враховувати транспортування сировини, такої як пісок, гравій та каміння, які не класифікуються як автомобільний транспорт.

У Кракові також триває інтенсивне будівництво як нових будівель, так і реконструкція і знесення старих будинків, що також спричиняє значне збільшення викидів твердих частинок. Такі роботи, як земляні, транспортування будівельних матеріалів, демонтаж застарілих будівель, можуть негативно впливати на якість атмосферного повітря міста.

На забруднення повітря міста та його околиць також впливають викиди, пов'язані з військовою діяльністю, яка сприяє викидам парникових газів. Ці викиди є результатом споживання палива армією та використання боєприпасів під час навчання, кількість яких значно збільшилась під час воєної агресії на Україні і шантажу європейських країн з російської сторони [21].

Висновки

Системи моніторингу, які досить активно останнім часом використовуються, дозволяють швидко виявляти збільшення концентрацій забруючих речовин, в тому числі у атмосферному повітрі. Регулярний збір даних про якість повітря дозволяє аналізувати зміни та виявляти джерела забруднення. Це важливо для планування дій, спрямованих на покращення якості повітря. Інформація про джерела викидів має вирішальне значення для розробки політики охорони навколишнього середовища, екологічної безпеки та правових норм, спрямованих на обмеження шкідливих викидів у атмосфері.

Результати проведеного аналізу показали, що не всі обмеження щодо забруднення повітря, запроваджені міською владою Кракова, дали очікувані результати. Наразі найбільшу загрозу становлять викиди забруднюючих речовин від автомобільного транспорту. У 2024 році загальні викиди оксидів азоту (NO_x), діоксиду сірки (SO₂), твердих частинок (PM₁₀ та PM_{2,5}) та бензо(а)пірену від автомобільного транспорту в Кракові склали понад 2 млн 700 тисяч кг/рік. Рівень забруднення у цьому секторі зріс порівняно з попередніми роками. Найвищі концентрації забруднюючих речовин були зафіксовані на дорогах та перехрестях з інтенсивним рухом транспорту. Постійно зростаюча кількість транспортних засобів на дорогах та їх неналежне обслуговування та ремонт сприяють проблемам забруднення повітря. Автомобільний транспорт також є основним джерелом забруднення навколишнього середовища шумом.

З результатів проведених аналізів видно, що найбільша проблема забруднення повітря в комунальних та побутових секторах була зафіксована теж у 2024 році. Загальні викиди оксидів азоту (NO_x), діоксиду сірки (SO₂), твердих частинок (PM₁₀ та PM_{2,5}) та бензо(а)пірену в Кракові склали біля 434 тисячі кг/рік. Основними джерелами викидів з цього сектору є низькоєфективні побутові прилади, котельні установки, неправильна їх експлуатація, поганий

технічний стан та спалювання низькоякісного палива та побутових відходів. Незважаючи на нормативні акти, багато домогосподарств продовжували спалювати відходи, що значно погіршувало якість повітря.

У аналізовані роки спостерігалось зменшення викидів забруднюючих речовин у повітря з точкових джерел у Кракові. Незважаючи на скорочення викидів, значення залишились високими. У 2024 році загальні викиди оксидів азоту (NO_x), діоксиду сірки (SO₂), твердих частинок (PM₁₀ та PM_{2,5}) та бензо(а)пірену становили понад 2 млн 700 тисяч кг/рік. Збільшення викидів було зумовлене будівництвом нових заводів, а також розширенням і розвитком існуючих промислових закладів. Основними джерелами викидів з цього сектору є великі промислові об'єкти, теплоелектроцентралі, теплоцентралі, котельні, сміттєспалювальні заводи, а також нафтопереробні, сталеливарні, цементні заводи, хімічна та переробна промисловість.

Висока щільність населення та автомобільний, залізничний та трамвайний рух спричиняють ще й до всього високий рівень шуму. У багатьох частинах міста бракує тихих зон.

Щоб зменшити викиди забруднюючих речовин, слід підвищувати обізнаність громадян за допомогою проведення заходів з покращення якості повітря. Вкрай важливо продовжувати протидіяти викидам від побутових котлів шляхом продовження термомодернізації будівель та заміною джерел тепла на більш екологічні. Також надзвичайно важливо скоротити викиди від точкових джерел шляхом впровадження сучасних рішень, таких як використання циклонів, рукавних фільтрів, електростатичних фільтрів та каталітичних нейтралізаторів. Заміна автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння на електроавтомобілі значно зменшить викиди від транспорту та покращить акустичний клімат міста. Впровадження інтелектуальних світлофорів, систем управління дорожнім рухом, розвиток громадського транспорту та

організація зелених зон також позитивно вплинуть на навколишнє середовище.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jędrak J., Konduracka E., Badyda A., Dąbrowiecki A. Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie. 2017.
2. URL: https://loveair.pl/smog/najbardziej-zanieczyszczone-miasta-polski-i-europy?srsId=AfmBOOrL7L2q9PPKD3ILownvoSQU_edEEhpxu2PV4gMnLUVywkRnwzP
3. Kalda G., Krokos J., Pietrucha-Urbanik K. Analysis of the Factors Contributing to Environmental Pollution in the Subcarpathian Province. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2024. Vol 71. Pp. 19–31. URL: <https://doi.org/10.7862/rb.2024.2>
4. Kalda G., Łopuszyńska P. Analiza zagrożeń środowiska Podkarpacia. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. T. XXXI, z. 61 (nr 1/2014). 2014. S. 101–117.
5. Danek T., Weglińska E., Zareba M. The influence of meteorological factors and terrain on air pollution concentration and migration : a geostatistical case study from Krakow. *Scientific Reports*. 2022.
6. URL: https://przemylisrodowisko.pl/jakie-sa-glowne-zrodla-emisji-zanieczyszczen-do-powietrza-z-przemyslu-i-jakie-sektory-najbardziej-przyczyniaja-sie-do-tego#_ftn1
7. Kosior L., Kalda G., Pietrucha-Urbanik K. Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza Warszawy. *Problems and Innovations in the Development of Engineering, Technologies and Transport : II International scientific conference of students and young scientists*. 24–26.04.2025. Pp. 423–437.
8. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie : Ocena jakości powietrza w strefach w Polsce : Zbiórny raport krajowy z rocznej oceny jakości powietrza w strefach wykonanej przez GIOŚ według zasad określonych w art. 89 ustawy “Prawo ochrony środowiska”. Warszawa, 2021.
9. Kuchcik M., Milewski P. Zanieczyszczenie powietrza w Polsce – stan, przyczyny i skutki. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. St. Leszczyckiego, PAN, 2018.
10. URL: <https://krakowskialarmsmogowy.pl/portfolio/analiza-zmian-jakosci-powietrza-w-krakowie-i-malopolsce/>
11. URL: https://panoramafirm.pl/zaklady_produkcyjne/malopolskie,,krakow”
12. URL: https://www.bip.krakow.pl/?sub_dok_id=20376
13. Kalda G., Paździorny T., Pietrucha-Urbanik K. Noise Analysis and Reduction Methods in Sanitation Facilities and Equipment. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2022. Z. 69. Str. 17–26. DOI:10.7862/rb.2022.2.
14. Kalda G., Sokolan Yu., Pietrucha-Urbanik K., Studziński A. Occupational and Ecological Safety of Employees. Rzeszów, 2023. 156 p.
15. URL: <https://www.geoportal.gov.pl>
16. URL: https://www.krakow.pl/start/13183,artykul,charakterystyka_obszaru_podlegajacego_ocenie.html
17. URL: https://www.krakow.pl/start/13224,artykul,identyfikacja_i_charakterystyka_zrodel_halasu.html
18. Saint-Gobain Polska. Raport : Polska w decybelach. 2020.
19. Kalda G. Ochrona przed hałasem. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*. Rzeszów, 2020. 151 str.
20. URL: <https://rynekpierwotny.pl/wiadomosci-mieszkaniowe/ciche-osiedla-mieszkaniowe/11998/>
21. URL: <https://ziemianarozdrozu.pl/przemilczane-emisje-wojny-i-dzialania-wojskowe-odbijaja-sie-rowniez-na-klimacie/>

REFERENCES

1. Jędrak J., Konduracka E., Badyda A. and Dąbrowiecki A. Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie. 2017. (in Polish).
2. URL: https://loveair.pl/smog/najbardziej-zanieczyszczone-miasta-polski-i-europy?srsId=AfmBOOrL7L2q9PPKD3ILownvoSQU_edEEhpxu2PV4gMnLUVywkRnwzP
3. Kalda G., Krokos J. and Pietrucha-Urbanik K. Analysis of the Factors Contributing to Environmental Pollution in the Subcarpathian Province. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2024, vol. 71, pp. 19–31. URL: <https://doi.org/10.7862/rb.2024.2>
4. Kalda G. and Łopuszyńska P. Analiza zagrożeń środowiska Podkarpacia. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, t. XXXI, z. 61 (nr 1/2014), pp. 101–117. (in Polish).
5. Danek T., Weglińska E. and Zareba M. The influence of meteorological factors and terrain on air pollution concentration and migration : a geostatistical case study from Krakow. *Scientific Reports*. 2022.
6. URL: https://przemylisrodowisko.pl/jakie-sa-glowne-zrodla-emisji-zanieczyszczen-do-powietrza-z-przemyslu-i-jakie-sektory-najbardziej-przyczyniaja-sie-do-tego#_ftn1
7. Kosior L., Kalda G. and Pietrucha-Urbanik K. Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza Warszawy. *Problems and Innovations in the Development of Engineering, Technologies and Transport : . II International scientific conference of students and young scientists*. 24–26.04.2025, Khmelnytskyi, pp. 423–437.

8. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie : Ocena jakości powietrza w strefach w Polsce : Zbiорczy raport krajowy z rocznej oceny jakości powietrza w strefach wykonanej przez GIOŚ według zasad określonych w art. 89 ustawy "Prawo ochrony środowisk", Warszawa, 2021. (in Polish).
9. Kuchcik M. & Milewski P. Zanieczyszczenie powietrza w Polsce – stan, przyczyny i skutki. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. St. Leszczyckiego, PAN, 2018.
10. URL: <https://krakowskialarmsmogowy.pl/portfolio/analiza-zmian-jakosci-powietrza-w-krakowie-i-malopolsce/>
11. URL: https://panoramafirm.pl/zaklady_produkcyjne/malopolskie,,krakow"
12. URL: https://www.bip.krakow.pl/?sub_dok_id=20376
13. Kalda G., Paździorny T. and Pietrucha-Urbanik K. Noise Analysis and Reduction Methods in Sanitation Facilities and Equipment. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. 2022, z. 69, pp. 17–26. DOI:10.7862/rb.2022.2.
14. Kalda G., Sokolan Yu., Pietrucha-Urbanik K. and Studziński A. Occupational and Ecological Safety of Employees. Rzeszow, 2023, 156 p.
15. URL: <https://www.geoportal.gov.pl>
16. URL: https://www.krakow.pl/start/13183,artykul,charakterystyka_obszaru_podlegajacego_ocenie.html
17. URL: https://www.krakow.pl/start/13224,artykul,identyfikacja_i_charakterystyka_zrodel_halasu.html
18. Saint-Gobain Polska. Raport : Polska w decybelach. 2020.
19. Kalda G. Ochrona przed hałasem. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów, 2020, 151 p.
20. URL: <https://rynekpierwotny.pl/wiadomosci-mieszkaniowe/ciche-osiedla-mieszkaniowe/11998/>
21. URL: <https://ziemianarozdrozu.pl/przemilczane-emisje-wojny-i-dzialania-wojskowe-odbijaja-sie-rowniez-na-klimacie/>

Надійшла до редакції: 13.02.2026.

УДК 624.05

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.71.1227

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ БУДІВНИЦТВА АВТОМАТИЗОВАНИХ ПАРКУВАЛЬНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ЩІЛЬНОЇ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

КРАВЧУНОВСЬКА Т. С.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
КУДРЕЙКО Є. Д.², *асп.*

^{1*} 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: t.s.kravchunovska@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0986-8995

² 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 (099) 067-06-47, e-mail: ed.kudreyko@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-3758-4462

Анотація. Постановка проблеми. Зростання кількості транспортних засобів у сучасних містах, особливо в умовах обмеженого міського простору, створює гостру потребу у впровадженні новітніх, ефективних рішень для організації паркування. Особливо актуальною ця проблема стає для центральних районів великих міст із щільною забудовою, де традиційні методи будівництва паркінгів часто є неможливими або економічно недоцільними. Наразі завдання організації в умовах щільної міської забудови масового будівництва об'єктів, призначених для постійного та тимчасового зберігання автомобілів, повністю не вирішено. Поштовхом до впровадження таких проєктів буде забезпечення їх високої прибутковості завдяки якісним проєктним та організаційно-технологічним рішенням із дотриманням світових стандартів. Будівництво автоматизованих паркувальних систем дозволить значно збільшити кількість паркомісць на обмеженій площі, зберігаючи при цьому цілісність міської забудови та забезпечуючи економію часу, дотримання екологічних норм і вимог безпеки. **Мета статті.** Обґрунтування доцільності будівництва автоматизованих паркувальних систем в умовах щільної міської забудови (на прикладі історичного центру м. Дніпро). **Висновок.** На основі даних про успішні міжнародні практики здійснено порівняльний аналіз ефективності автоматизованих та традиційних паркувальних систем, а також запропоновано комплексні заходи щодо організації будівельного процесу з урахуванням мінімізації впливу на навколишнє середовище та збереження життєдіяльності міського району. Впровадження автоматизованих паркувальних систем дозволяє втричі і більше збільшити місткість паркінгу, скоротити витрати часу на пошук паркувального місця, знизити транспортне навантаження та зберегти архітектурну цілісність міста. Організація будівництва в таких умовах потребує застосування інноваційних будівельних технологій, чіткої логістики і комплексного підходу, що мінімізує негативний вплив на навколишнє природне середовище і життєдіяльність району.

Ключові слова: *паркінг; автоматизована паркувальна система; щільна забудова; будівельне інформаційне моделювання; ефективність*

SUBSTANTIATION OF THE EXPEDIENCY OF THE CONSTRUCTION OF AUTOMATED PARKING SYSTEMS IN DENSE URBAN AREAS

KRAVCHUNOVSKA T.S.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KUDREIKO Ye.D.², *PhD Stud.*

^{1*} 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 (056) 756-33-66, e-mail: t.s.kravchunovska@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0986-8995

² 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 (099) 067-06-47, e-mail: ed.kudreyko@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-3758-4462

Abstract. Raising of problem. The increasing number of vehicles in modern cities, especially in conditions of limited urban space, creates an urgent need for the implementation of innovative, effective solutions for parking organisation. This problem is particularly acute in the central areas of large cities with dense development, where traditional methods of parking construction are often impossible or economically unfeasible. At present, the task of organising the mass construction of facilities for permanent and temporary car storage in densely built-up urban areas has

not been fully resolved. The impetus for the implementation of such projects will be to ensure their high profitability through high-quality design, organisational and technological solutions that comply with international standards. The construction of automated parking systems will significantly increase the number of parking spaces in a limited area, while preserving the integrity of urban development and ensuring time savings, compliance with environmental standards and safety requirements. **Purpose of the article.** Substantiating the feasibility of construction of automated parking systems in densely built-up urban areas (using the example of the historic centre of Dnipro). **Conclusion.** Based on data on successful international practices, a comparative analysis of the effectiveness of automated and traditional parking systems was carried out, and comprehensive measures were proposed for organising the construction process, taking into account the minimisation of environmental impact and the preservation of urban life. The implementation of automated parking systems allows for a threefold or more increase in parking capacity, reduces the time spent searching for a parking space, lowers traffic congestion, and preserves the architectural integrity of the city. The organisation of construction in such conditions requires the use of innovative construction technologies, clear logistics and a comprehensive approach that minimises the negative impact on the natural environment and the life of the area.

Keywords: *parking; automated parking system; dense area; building information modelling; efficiency*

Постановка проблеми. Зростання кількості транспортних засобів у сучасних містах, особливо в умовах обмеженого міського простору, створює гостру потребу у впровадженні новітніх, ефективних рішень для організації паркування. Особливо актуальною ця проблема стає для центральних районів великих міст із щільною забудовою, де традиційні методи будівництва паркінгів часто є неможливими або економічно недоцільними.

Аналіз публікацій. Наразі завдання організації в умовах щільної міської забудови масового будівництва об'єктів, призначених для постійного та тимчасового зберігання автомобілів, повністю не вирішено.

Поштовхом до впровадження таких проєктів буде забезпечення їх високої прибутковості завдяки якісним проєктним та організаційно-технологічним рішенням із дотриманням світових стандартів.

В умовах щільної міської забудови реалізувати таке завдання можна шляхом створення автоматизованих паркувальних систем (АПС). За цих умов будівництво АПС дозволить значно збільшити кількість паркомісць на обмеженій площі, зберігаючи при цьому цілісність міської забудови та забезпечуючи економію часу, дотримання екологічних норм і вимог безпеки [1–3].

Формулювання мети статті. Метою дослідження є обґрунтування доцільності будівництва автоматизованих паркувальних систем в умовах щільної міської забудови (на прикладі історичного центру м. Дніпро).

Результати досліджень. Проєктування АПС у щільно забудованих міських районах, особливо в історичних частинах міст, де відсутня можливість уникати існуючих інженерних мереж, потребує комплексного підходу до організації робіт із перенесення комунікацій. Важливо передбачити раціональні проєктні рішення та провести технічні заходи з винесення, перепідключення та відновлення функціональності мереж, що гарантуватиме безперервне забезпечення послуг для мешканців та підприємств, розташованих на ділянці забудови.

Будівництво АПС здійснюється в умовах безперервної експлуатації прилеглих будівель, що потребує підтримання доступності транспортних шляхів для обслуговуючого, службового та приватного транспорту. Проєктування має враховувати організацію під'їздів і зон для завантаження / розвантаження, а також передбачати заходи щодо мінімізації тимчасових обмежень руху, щоб уникнути паралізації життєдіяльності в районі забудови.

Щодо впливу будівництва та експлуатації АПС на навколишнє середовище, основну увагу слід приділяти контролю рівня шуму та вібрацій, які виникають під час виконання будівельних робіт та роботи автоматизованих механізмів. Інших значних негативних впливів, які б могли зашкодити екології, не виявлено. Автоматизовані паркувальні системи сприяють зменшенню викидів від транспорту в міському середовищі завдяки

скороченню часу на пошук місця для паркування. Додатковою перевагою може стати встановлення сонячних батарей на дахах АПС, що дозволить використовувати згенеровану електроенергію для живлення систем паркування, підвищуючи енергоефективність об'єкта.

Реалізація АПС на обмеженій площі зазвичай передбачає вертикальне

розміщення автомобілів на 3–5 рівнях із використанням ліфтів і конвеєрних систем. Як показують дослідження [4], автоматизовані паркінги дозволяють розмістити на 150–250 % більше автомобілів порівняно з класичними багаторівневими чи наземними паркінгами [4] (табл. 1).

Таблиця 1

Приклад розрахунку щільності паркування

Параметри	Традиційний паркінг	АПС, 3 поверхи	АПС, 4 поверхи	АПС, 5 поверхів
Загальна площа ділянки, м ²	300	300	300	300
Площа на 1 автомобіль, м ²	26	9,97	7,46	6,03
Кількість автомобілів, що можна розмістити, шт.	11	30	40	50

Для типового паркінгу площа на один автомобіль становить 26 м² (з урахуванням під'їздів і маневрових зон).

АПС дозволяє зменшити площу на один автомобіль за рахунок вертикального використання простору та автоматизації. При цьому досягається таке скорочення площі:

- 3 поверхи – скорочення площі на 61,67 %;
- 4 поверхи – скорочення площі на 71,25 %;
- 5 поверхів – скорочення площі на 76,87 % [5–12].

Історичний центр м. Дніпро характеризується щільною забудовою XIX–XX століття, з вузькими вулицями, великою кількістю пам'яток архітектури та важливою транспортною інфраструктурою. Зростаюче

навантаження транспортом спричиняє проблеми із паркуванням, що погіршує якість життя та створює хаотичне паркування.

Будівництво АПС за таких умов потребує комплексного підходу, що передбачає:

- мінімізацію обсягів земляних робіт шляхом використання пальових фундаментів або фундаментних плит;
- використання модульних металевих конструкцій для швидкого монтажу;
- впровадження комплексної логістики постачання матеріалів із урахуванням обмеженого доступу;
- застосування баштових кранів із малим радіусом повороту;
- організацію тимчасових зон для зберігання конструкцій.

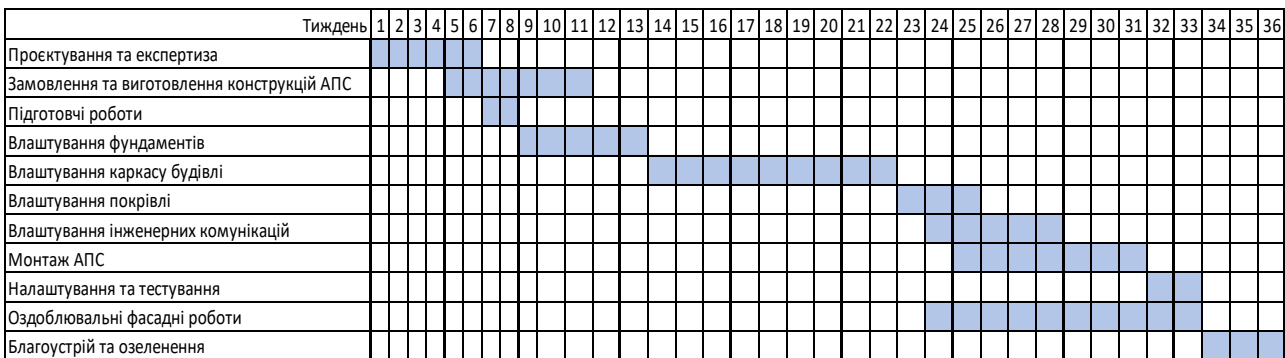


Рис. 1. Основні етапи будівництва АПС в історичному центрі м. Дніпро

Наприклад, проектування АПС площею 300 м², висотою 20 м (4 поверхи), із

застосуванням металевих конструкцій та фундаментних плит дозволяє завершити

монтаж за 32–36 тижнів (рис. 1), що значно скорочує вплив будівництва на навколишнє середовище.

Для обґрунтування доцільності та ефективності будівництва АПС потрібно

виконати порівняльний аналіз традиційних та автоматизованих паркувальних систем. Для цього розглянемо ключові параметри, представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння ключових параметрів автоматизованих і традиційних паркувальних систем

Параметри	Традиційний паркінг	Автоматизований паркінг	Джерело
Площа на 1 автомобіль (м ²)	15	5-7	European Parking Association, 2021
Кількість автомобілів на 300 м ² (шт.)	20	80–100	ParkPlus Reports, 2020
Час пошуку місця (хв)	10–15	2–5	IHI Infrastructure Review, 2022
Рівень впливу на навколишнє середовище	Середній	Низький	Automated Parking Systems, 2021
Вартість будівництва (умовн.)	1,0	1,5–2,0	Dnipro Urban Development Dept, 2024

Виконаємо розрахунок економії часу при застосуванні АПС.

Припустимо, що в районі перебуває 5000 автомобілів, які щоденно шукають паркувальне місце у традиційному паркінгу по 10 хвилин. Тоді загальний час пошуку паркувального місця становитиме: $5000 \times 10 \text{ хв.} = 50000 \text{ хв.} = 833,33 \text{ год.}$

При використанні АПС час на пошук паркувального місця скорочується до 3 хвилин. Тоді загальний час пошуку паркувального місця становитиме: $5000 \times 3 \text{ хв.} = 15000 \text{ хв.} = 250 \text{ годин.}$

Таким чином, економія часу становитиме 583,33 години на день, а це позначиться на скороченні транспортних заторів, зниженні екологічного навантаження та позитивно вплине на навколишнє природне середовище.

В умовах щільної міської забудови будівельний майданчик характеризується обмеженим простором для зберігання матеріалів і конструкцій. Це вимагає ретельного планування постачання та монтажу з метою мінімізації перебування матеріалів на об'єкті та виключення накопичення запасів.

Організація зберігання матеріалів і конструкцій здійснюється в стиснених умовах: на майданчику неможливо розгорнути великі склади, тому матеріали

доставляються строго за потребою та у мінімальних обсягах.

Необхідне маркування всіх конструктивних елементів АПС, що виконується на заводі-виробнику або на тимчасовій базі. Кожен елемент має унікальний ідентифікатор, що включає номер вузла, черговість монтажу та місце розміщення в конструкції. Це дозволяє однозначно і швидко визначати потрібні деталі на об'єкті, уникати плутанини та затримок.

Відповідальна особа на майданчику або керівник проекту заздалегідь формує списки матеріалів і вузлів для кожного етапу робіт. Ці списки передаються постачальникам і монтажникам, що забезпечує своєчасне постачання та монтаж, без накопичення зайвих деталей на майданчику.

Для уникнення перевантаження майданчика розробляється погодинний графік постачання матеріалів, що враховує можливості транспорту і технологічний процес. Дотримання такого графіка дозволяє рівномірно розподілити навантаження на зони розвантаження і монтажу.

Після постачання матеріали та конструкції одразу ж передаються в роботу. Такий підхід мінімізує час їх перебування на майданчику, зменшує ризик пошкоджень, спрощує логістику і запобігає зайвому захащенню території.

Для транспортування та монтажу застосовується техніка з малим радіусом повороту і високою маневреністю, що дозволяє працювати в обмеженому просторі без блокування навколишніх ділянок.

Організація логістики та ресурсів на стисненому майданчику є ключовою складовою успішного будівництва АПС в умовах щільної міської забудови. Система маркування, чітке планування постачання за погодинним графіком та оперативний монтаж без тривалого зберігання матеріалів дозволяють мінімізувати вплив на оточення, забезпечити безперервність робіт і зберегти життєздатність району. Такий підхід є необхідним для реалізації ефективних та екологічно безпечних автоматизованих паркувальних систем у центральних частинах міст.

Сучасне будівництво АПС у щільній міській забудові потребує максимальної координації, точності і прозорості управління процесами. Для досягнення цих цілей широко впроваджуються технології будівельного інформаційного моделювання (ВІМ-технологій), що дозволяють підвищити ефективність і безпеку реалізації проєктів. ВІМ-технології створюють єдину цифрову модель паркувальної системи, в якій інтегровані всі архітектурні, конструктивні, інженерні рішення, а також технологічні процеси. Це дає змогу усім учасникам проєкту – архітекторам, інженерам, підрядникам – працювати в спільному інформаційному середовищі, суттєво знижуючи ризики помилок та непорозумінь.

Використання ВІМ-технологій сприяє покращенню планування будівництва і логістики, оскільки дає змогу змодельовати послідовність будівельних операцій, оптимізувати терміни, маршрути постачання матеріалів та організацію монтажу. Особливо це актуально для умов міської забудови з обмеженою площею, де неможливо зберігати великі запаси матеріалів на майданчику. Крім того, ВІМ-технологія дозволяє автоматично виявляти і усувати колізії між інженерними мережами, конструктивними елементами та обладнанням, що мінімізує потребу в

коригуваннях в процесі будівництва, економить час і кошти. Завдяки цифровій моделі можна також контролювати якість виконання робіт в режимі реального часу, порівнюючи фактичний стан об'єкта з проєктною документацією, що дозволяє оперативно виявляти і усувати негативні відхилення.

Застосування ВІМ-технології підвищує безпеку будівництва, оскільки дозволяє оцінити потенційні ризики для робітників і навколишньої інфраструктури, розробити оптимальні схеми руху техніки і персоналу, що знижує ймовірність аварій. Крім того, ВІМ-моделі можуть містити розрахунки енергоспоживання паркувальної системи, сприяти впровадженню сонячних батарей та екологічно чистих матеріалів, що позитивно впливає на екологічний стан міського середовища.

Практичний приклад використання ВІМ-технології – це будівництво багаторівневої АПС у центральній частині м. Дніпро, де за допомогою цифрової моделі було змодельовано всі етапи монтажу, враховано інженерні мережі, організовано постачання та встановлення збірних конструкцій із мінімальним впливом на рух транспорту. Колізії, виявлені на стадії проєктування, дозволили уникнути додаткових робіт і затримок в процесі будівництва.

Отже, впровадження ВІМ-технологій у будівництво АПС значно підвищує точність проєктування, скорочує терміни реалізації, знижує ризики і зменшує негативний вплив на навколишнє природне середовище. ВІМ-технології забезпечують інтегрований підхід до управління проєктом, сприяють сталому розвитку та підвищують безпеку в умовах щільної міської забудови.

Для успішної реалізації проєкту створення АПС у щільній забудові м. Дніпро необхідно зберегти життєдіяльність району, не допустити паралізації руху, шуму і дискомфорту для мешканців.

Для цього потрібно вжити таких основних заходів:

- поетапне перекриття руху: роботи ведуться зонально, із тимчасовим перекриттям лише частини вулиці;

- графік робіт із урахуванням години пік: вивантаження та монтаж матеріалів – у позаробочий час або у нічні години;
- застосування мобільних та баштових кранів із мінімальним радіусом дії: для роботи у вузьких вуличках;
- організація інформаційної підтримки мешканців: сповіщення про графік робіт, маршрути об'їзду;
- моніторинг стану суміжних будівель: для запобігання пошкодженням;
- впровадження систем пилопридушення і шумопоглинання: для мінімізації негативних екологічних впливів.

Висновки

Автоматизовані паркувальні системи є ефективним інструментом вирішення проблеми дефіциту паркувальних місць у щільній міській забудові, особливо в історичному центрі міста, зокрема такого, як м. Дніпро.

На основі даних про успішні міжнародні практики здійснено порівняльний аналіз ефективності автоматизованих та традиційних паркувальних систем, а також запропоновано комплексні заходи щодо організації будівельного процесу з урахуванням мінімізації впливу на навколишнє середовище та збереження життєдіяльності міського району.

Впровадження автоматизованих паркувальних систем дозволяє втричі і більше збільшити місткість паркінгу, скоротити витрати часу на пошук паркувального місця, знизити транспортне навантаження та зберегти архітектурну цілісність міста.

Організація будівництва в таких умовах потребує застосування інноваційних будівельних технологій, чіткої логістики і комплексного підходу, що мінімізує негативний вплив на навколишнє природне середовище і життєдіяльність району.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цвіркун Д. А., Костюченко О. А. Зарубіжний досвід проектування багаторівневих паркінгів. *Теорія та практика дизайну*. 2024. Вип. 34. С. 136–145. URL: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2024.34.16>
2. Куцевич В. В., Кисіль С. С., Білик А. С. та ін. Принципи архітектурно-планувальної організації багатоповерхових автостоянок : колективна наукова монографія. Київ : КНУТД, УЦСБ, КНУБА, 2019. 184 с.
3. MDPI. You Kong, Jihong Ou, Longfei Chen, Fengchun Yang, Bo Yu. The Environmental Impacts of Automated Vehicles on Parking : A Systematic Review. *Sustainability*. № 15 (20). 2023. Pp. 15033. URL: <https://doi.org/10.3390/su152015033>
4. European Parking Association. URL: <https://europeanparking.eu/epa-awards-2021-2022/>
5. ArXiv. Computer Vision in Automated Parking Systems : Design, Implementation and Challenges (Heimberger et al.). 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2109.10391>
6. ArXiv. Toward Efficient Physical and Algorithmic Design of Automated Garages (Guo, Yu). 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2301.10971>
7. Lödige Industries. (n.d.). Automated Parking Solutions. URL: <https://www.lodige.com/en/solutions/automated-parking/>
8. MDPI. Plihal J. & Hofman R. Transport Automation in Urban Mobility : A Case Study of an Autonomous Parking System. *Vehicles*. № 4 (2). 2022. Pp. 326–343. URL: <https://doi.org/10.3390/vehicles4020019>
9. MDPI. Assessing the Role of Autonomous Vehicles in Urban Areas : A Systematic Review. *Future Transportation*. № 4 (2). 2023. Pp. 321–348. URL: <https://doi.org/10.3390/futuretransp4020020>
10. MWest Holdings. Parking “Robots” Provide Relief for Developers in Dense Urban Areas. 2022. URL: <https://mwestholdings.com/robotic-parking-urban-development/>
11. ResearchGate. Md Saifullah. Innovations in Automated Parking Solutions. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication/373802603>
12. ScienceDirect. Automated Vehicles and the Urban Parking Paradigm: Environmental Implications. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920924001025>

REFERENCES

1. Tsvirkun D.A. and Kostiuhenko O.A. *Zarubizhnyi dosvid proiektuvannia bahatorivnevyykh parkinhiv* [Foreign experience in designing multi-level car parks]. *Teoriia ta praktyka dizainu* [Theory and Practice of Design]. 2024, iss. 34, pp. 136–145. URL: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2024.34.16> (in Ukrainian).
2. Kutsevych V.V., Kysil S.S., Bilyk A.S. and al. *Pryntsypy arkhitekturno-planuvальноi orhanizatsii bahatopoverkhovykh avtostoiianok: kolektyvna naukova monohrafiia* [Principles of architectural and planning

organisation of multi-storey car parks: collective scientific monograph]. Kyiv : KNUTD, UTsSB, KNUBA, 2019, 184 p. (in Ukrainian).

3. MDPI. You Kong, Jihong Ou, Longfei Chen, Fengchun Yang and Bo Yu. The Environmental Impacts of Automated Vehicles on Parking : A Systematic Review. Sustainability. 2023, no. 15 (20), pp. 15033. URL: <https://doi.org/10.3390/su152015033>

4. European Parking Association. URL: <https://europeanparking.eu/epa-awards-2021-2022/>

5. ArXiv. Computer Vision in Automated Parking Systems : Design, Implementation and Challenges (Heimberger et al.). 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2109.10391>

6. ArXiv. Toward Efficient Physical and Algorithmic Design of Automated Garages (Guo, Yu). 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2301.10971>

7. Lödige Industries. (n.d.). Automated Parking Solutions. URL: <https://www.lodige.com/en/solutions/automated-parking/>

8. MDPI. Plihal J. and Hofman R. Transport Automation in Urban Mobility : A Case Study of an Autonomous Parking System. Vehicles. 2022, no. 4 (2), pp. 326–343. URL: <https://doi.org/10.3390/vehicles4020019>

9. MDPI. Assessing the Role of Autonomous Vehicles in Urban Areas : A Systematic Review. Future Transportation. 2023, no. 4 (2), pp. 321–348. URL: <https://doi.org/10.3390/futuretransp4020020>

10. MWest Holdings. Parking “Robots” Provide Relief for Developers in Dense Urban Areas. 2022. URL: <https://mwestholdings.com/robotic-parking-urban-development/>

11. ResearchGate. Md Saifullah. Innovations in Automated Parking Solutions. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication/373802603>

12. ScienceDirect. Automated Vehicles and the Urban Parking Paradigm : Environmental Implications. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920924001025>

Надійшла до редакції: 25.02.2026 р.

УДК 628.161

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.78.1228

ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТА НАНОСТРУКТУРОВАНИХ КОАГУЛЯНТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОСВІТЛЕННЯ МАЛОМУТНИХ КОЛЬОРОВИХ ВОД

НЕСТЕРОВА О. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
НАГОРНА О. К.², канд. техн. наук, доц.,
НЕЧИТАЙЛО М. П.³, канд. техн. наук, доц.,
ШАРКОВ В. В.⁴, канд. техн. наук, доц.,
НЕСТЕРОВ Я. С.⁵, ас.

^{1*} 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, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

² 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, ORCID ID: 0000-0003-4027-9336

³ 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, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

⁴ 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: shar_kov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8942-3701

⁵ 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: jkiggen97@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0664-6684

Анотація. Постановка проблеми. Актуальність дослідження зумовлена складністю очищення маломутних кольорових вод малопотужних поверхневих джерел, що характеризуються низькою мінералізацією, нестабільним хімічним складом та високим вмістом природних органічних речовин (гумусових і фульвокислот). Такі фактори значно ускладнюють процеси коагуляційного освітлення та знебарвлення, оскільки традиційні реагенти на основі солей алюмінію та заліза ефективні лише у вузькому діапазоні рН і температур. У результаті їх застосування в умовах сезонних коливань якості води часто є малоефективним, що потребує нових технологічних підходів. Проблема ускладнюється тим, що нестабільність природних характеристик вихідної води обмежує можливості точного підбору доз реагентів та режимів їх введення. Це вимагає впровадження інноваційних рішень, здатних забезпечити стабільність процесів навіть за змінних умов. Одним із перспективних напрямів розвитку є використання полімерних та наноструктурованих коагулянтів, які завдяки високій адсорбційній активності та ширшому робочому діапазону рН дозволяють підвищити ефективність знебарвлення та знизити залежність процесів від температури й буферної здатності води. Поєднання таких реагентів із методами попереднього окиснення створює умови для руйнування стійких органічних комплексів і сприяє формуванню щільніших і седиментаційно стійких флокул. **Мета дослідження.** Обґрунтування доцільності застосування полімерних та наноструктурованих коагулянтів для підвищення ефективності освітлення й знебарвлення маломутних кольорових вод поверхневих джерел. **Результати.** Використання полімерних та наноструктурованих коагулянтів у поєднанні з комбінованими схемами попереднього окиснення є перспективним напрямом розвитку технологій очищення маломутних кольорових вод. Це дозволяє розширити робочий діапазон процесів коагуляції, забезпечити утворення більш щільних та стійких флокул і підвищити ефективність знебарвлення навіть у складних умовах малопотужних джерел. Впровадження адаптивних схем дозування реагентів із використанням онлайн-моніторингу показників води може гарантувати стабільність результатів очищення та відповідність сучасним вимогам до якості питної води.

Ключові слова: маломутні кольорові води; полімерні коагулянти; наноструктуровані реагенти; коагуляція; флокуляція; водопідготовка

USE OF POLYMERIC AND NANOSTRUCTURED COAGULANTS FOR IMPROVING THE CLARIFICATION EFFICIENCY OF LOW-TURBIDITY COLORED WATERS

NESTEROVA O.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
NAHORNA O.K.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
NECHYTAILO M.P.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SHARKOV V.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
NESTEROV Ya.S.⁵, *Ass.*

^{1*} 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, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

² 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, ORCID ID: 0000-0003-4027-9336

³ 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, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

⁴ 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: sharkov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8942-3701

⁵ 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: jkiggn97@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0664-6684

Abstract. Problem statement. The relevance of this study is determined by the complexity of treating low-turbidity colored waters from small surface sources, which are characterized by low mineralization, unstable chemical composition, and a high content of natural organic matter (humic and fulvic acids). These factors significantly complicate the processes of coagulation clarification and decolorization, since traditional reagents based on aluminum and iron salts are effective only within a narrow range of pH and temperature. As a result, their application under seasonal fluctuations of water quality is often inefficient, which necessitates new technological approaches. The problem is further complicated by the instability of the natural characteristics of source water, which limits the ability to accurately select reagent dosages and treatment regimes. This calls for innovative solutions capable of ensuring process stability even under variable conditions. One of the promising directions is the use of polymeric and nanostructured coagulants, which, due to their high adsorption activity and wider operational pH range, make it possible to increase decolorization efficiency and reduce the dependence of coagulation processes on temperature and buffering capacity. Combining such reagents with pre-oxidation methods creates conditions for the breakdown of stable organic complexes and promotes the formation of denser and more sedimentation-resistant flocs. **Purpose of the study.** Substantiation of the feasibility of using polymeric and nanostructured coagulants to increase the efficiency of clarification and discoloration of low-turbid colored waters of surface sources. **Results.** The use of polymeric and nanostructured coagulants in combination with integrated pre-oxidation schemes is a promising direction for the development of technologies for the treatment of low-turbidity colored waters. This approach expands the operational range of coagulation processes, ensures the formation of denser and more stable flocs, and increases decolorization efficiency even under the challenging conditions of small-scale water sources. The introduction of adaptive reagent dosing schemes based on online monitoring of water quality indicators can guarantee stable purification results and compliance with modern drinking water standards.

Keywords: *low-turbidity colored waters; polymeric coagulants; nanostructured reagents; coagulation; flocculation; water treatment*

Постановка проблеми. Очищення маломутних кольорових вод поверхневих джерел залишається однією з найскладніших задач сучасної водопідготовки. Такі води відзначаються низькою мінералізацією, нестабільним хімічним складом та підвищеним вмістом природних органічних речовин, зокрема гумінових і фульвокислот.

Ці чинники суттєво ускладнюють процеси коагуляції та флокуляції, оскільки стабілізують колоїдні системи й підвищують кольоровість.

Традиційні коагулянти на основі солей алюмінію та заліза ефективні лише у вузькому діапазоні рН та температур, що обмежує їхнє застосування за умов сезонних

коливань якості води. У малопотужних системах водопідготовки, які часто працюють з нестабільними джерелами, це призводить до зниження ефективності освітлення й знебарвлення, а також до зростання витрат реагентів.

Сучасні виклики у сфері забезпечення населення якісною питною водою вимагають впровадження нових технологічних рішень, здатних компенсувати вплив мінливих природних умов і підвищити ефективність роботи систем водопідготовки. Одним із перспективних напрямів є використання полімерних та наноструктурованих коагулянтів, які характеризуються підвищеною адсорбційною активністю, здатністю формувати щільні та стійкі флокули, а також ширшим діапазоном оптимальних умов застосування. Саме ці властивості створюють підґрунтя для оптимізації процесів освітлення та знебарвлення маломутних кольорових вод у малопотужних водозаборах.

Мета дослідження. Обґрунтування доцільності застосування полімерних та наноструктурованих коагулянтів для підвищення ефективності процесів освітлення й знебарвлення маломутних кольорових вод, визначення оптимальних умов їх використання та оцінка перспектив упровадження в малопотужних системах водопідготовки.

Аналіз літературних джерел. Кінетика процесів освітлення та знебарвлення води під час її первинної обробки окисниками у поєднанні з подальшим коагулюванням визначається сукупністю фізико-хімічних параметрів водного середовища. До ключових чинників належать іонно-сольовий склад, рівень рН, загальна лужність, температура, мутність, кольоровість та показники органічного забруднення (зокрема перманганатна окиснюваність). Для вод відкритих джерел особливо важливим є вплив біологічних домішок – фітопланктону, зоопланктону, залишків мікро- і макрофітів, а також сполук азоту, передусім амонійного.

У класичній праці Дж. Братбі детально проаналізовано фізико-хімічні механізми

коагуляції, підкреслено залежність ефективності процесу від рН, температури та природи органічних домішок. Автор наголошує, що особливо складним є освітлення та знебарвлення слабомутних вод, у яких концентрація колоїдних частинок недостатня для швидкої агрегації [1].

У навчально-методичних матеріалах В. Орлова зроблено акцент на практичних аспектах застосування коагулянтів для очищення природних вод. Автор вказує, що в умовах малопотужних водозаборів доцільно використовувати комбіновані схеми обробки, адже класична коагуляція може бути малоефективною при низьких концентраціях завислих та кольорових речовин [2].

У посібнику В. Хільчевського, М. Забокрицької та В. Стельмаха розглянуто гідроекологічні проблеми якості поверхневих джерел. Автори зазначають, що «кольоровість і наявність природних органічних речовин у воді малих річок значно ускладнюють процеси коагуляційного очищення» та потребують пошуку адаптивних технологій підготовки питної води [3].

Таким чином, аналіз літератури показує, що проблема коагуляції маломутних кольорових вод є міждисциплінарною та охоплює як фундаментальні питання колоїдної хімії [1], так і практичні інженерні рішення для локальних систем водопідготовки (В. Орлов, В. Хільчевський та ін.) [2–3].

Викладення основного матеріалу. Складність полягає у багатофакторності та динамічних взаємозв'язках між цими характеристиками, що робить неможливим повне описання процесів освітлення та знебарвлення лише на основі класичної теорії стабільності колоїдних систем. Сучасні дослідження свідчать, що до механізмів, які визначають ефективність коагуляції та флокуляції, залучаються не лише електростатичні взаємодії, але й адсорбційні, комплексоутворюючі та біохімічні процеси.

Останніми роками у світовій практиці набуває значення використання

комбінованих методів попередньої обробки – застосування окисників (озону, діоксиду хлору, перекису водню, персульфатів), а також фотокаталітичних та електрохімічних технологій, які змінюють структуру природних органічних речовин та знижують їхню стабільність у колоїдних системах. Це суттєво підвищує ефективність наступного коагулювання і сприяє формуванню щільніших та більш седиментаційно-стійких пластівців.

Крім того, розвиток математичного моделювання та застосування методів машинного навчання дозволяють прогнозувати кінетику процесів освітлення й знебарвлення з урахуванням великої кількості змінних параметрів. Це відкриває можливості для оптимізації дозування реагентів і режимів обробки, особливо у випадку малопотужних джерел, де якість води може значно коливатися у часі.

Під час розчинення традиційних коагулянтів, таких як сульфат алюмінію чи хлорид заліза, у водному середовищі відбувається гідроліз із утворенням гідросокомплексів відповідних металів. Ці сполуки здатні активно взаємодіяти з колоїдними та розчиненими домішками, ініціюючи процес агрегації частинок у більші флокули, що осаджуються під дією сили тяжіння або легко вилучаються під час фільтрації.

Ключовими параметрами, що визначають ефективність процесу, є кислотно-лужний баланс і температура води. Для алюмінієвмісних коагулянтів оптимальний робочий інтервал рН становить 6,0–7,5, за якого формується найбільша кількість аморфних гідроксидів $Al(OH)_3$, що мають розвинену поверхню й високу адсорбційну здатність. У випадку залізовмісних реагентів ($FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$) робочий діапазон ширший (5,0–9,0), проте при низьких температурах (<10 °C) швидкість гідролізу і подальшого утворення флокул значно знижується, що зменшує їх ефективність [1].

Сучасні дослідження показують, що використання модифікованих

поліалюмінійхлоридів та комбінованих коагулянтів (наприклад, Al/Fe - композитів) дозволяє частково зменшити залежність процесу від температурного режиму та стабілізувати роботу системи в умовах сезонних коливань якості води. Додаткове застосування полімерних флокулянтів (аніонних чи катіонних) забезпечує утворення щільніших і стійкіших пластівців, що прискорює процес відстоювання та покращує ефективність освітлення води.

З огляду на специфіку малопотужних джерел, де температура та рН можуть істотно коливатися протягом року, актуальним є пошук адаптивних схем коагуляційної обробки з автоматизованим регулюванням дозування реагентів на основі онлайн-моніторингу ключових показників якості води.

Сезонні коливання якості природних вод – підвищення концентрації органічних речовин навесні, масовий розвиток фітопланктону в літній період та зниження температури взимку – обумовлюють необхідність адаптивного коригування технологічних режимів попередньої обробки. Це особливо важливо при застосуванні коагулянтів, адже їх ефективність істотно зменшується поза межами оптимальних значень рН та температури, що підтверджується як теоретичними положеннями, так і практичними спостереженнями [1–2].

У таких умовах доцільним є впровадження комбінованих методів: зокрема, попереднє окиснення озonom, діоксидом хлору або перманганатом калію перед стадією коагуляції. Подібні рішення сприяють руйнуванню природних органічних речовин і полегшують подальшу агрегацію колоїдних частинок, формуючи щільніші та седиментаційно стійкі флокули. Українські дослідники наголошують, що для малопотужних джерел це дозволяє знизити нестабільність якості води та забезпечити більш передбачуваний ефект очищення [2–3].

Одним із ключових параметрів, що визначає ефективність коагуляційної обробки, є реакція середовища (рН). Для

маломутних кольорових вод процес коагуляції особливо чутливий до цього показника, що зумовлює потребу як у застосуванні підвищених доз реагентів, так і в точному регулюванні кислотно-лужного балансу. Практичні дослідження доводять: для освітлення каламутних вод оптимальними є відносно вищі значення рН, тоді як для ефективного знебарвлення м'яких вод більш результативними є нижчі його показники [1–2].

Підкислення кольорових вод сприяє прискоренню процесів агрегації частинок, оскільки досягається електронейтральність між позитивно зарядженими продуктами гідролізу коагулянтів та негативно зарядженими колоїдами. У разі відсутності такого балансу гідроліз, наприклад, сульфату алюмінію, може бути неповним або зовсім не відбутися [3]. Додаткові дослідження підтверджують, що оптимальні межі для ефективної дії алюмінієвмісних реагентів зазвичай становлять рН 6,0–6,7, тоді як залізовмісні коагулянти зберігають дієвість у ширшому діапазоні, але демонструють нижчу швидкість утворення пластівців за знижених температур [4–5].

Сучасні підходи передбачають також використання комбінованих методів: попереднє окиснення озоном чи перманганатом калію змінює заряд і структуру природних органічних речовин, що дозволяє підвищити ефективність процесу коагуляції навіть за несприятливих значень рН [6].

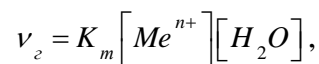
Забруднення, що визначають мутність і кольоровість природних вод, у більшості випадків представлені гідрофобними або слабогідрофільними колоїдними частинками органічного чи неорганічного походження. До таких належать гумусові речовини, продукти розкладу мікро- та макрофітів, а також тонкодисперсні мінеральні частки (глинисті частинки, кремнезем, оксиди металів). Через високу стабільність колоїдних систем їх видалення вимагає руйнування дифузного електричного шару, що забезпечує стабілізацію суспензії [1].

У технологіях водопідготовки для цього традиційно застосовують солі слабких основ

і сильних кислот, які в процесі гідролізу утворюють позитивно заряджені гідросокомплекси металів. Найпоширенішими реагентами є сульфат алюмінію $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$, сульфат заліза $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ та хлорид заліза $Fe_2Cl_3 \cdot nH_2O$. Продукти їхнього гідролізу – гідроксиди алюмінію та заліза – володіють високою адсорбційною здатністю і сприяють утворенню флокул, що ефективно осаджуються під дією сили тяжіння або видаляються під час фільтрації [2–3].

Сучасні дослідження підтверджують, що, попри високу ефективність цих реагентів, їхня дія істотно залежить від рН середовища, температури та вмісту природних органічних речовин (NOM). Для оптимізації процесів коагуляції все ширше застосовують модифіковані форми реагентів – поліалюмінійхлориди (ПАХ), поліалюмінійсульфати, а також комбіновані Al/Fe – коагулянти, які демонструють ширший робочий діапазон та кращу стійкість у сезонних умовах змін якості води [6–7].

Під час розчинення у воді коагулянти проходять гідроліз за реакцією:



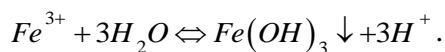
де K_m – коефіцієнт швидкості гідролізу; $[M_{en}^+]$ – концентрація катіонів у розчині коагулянту; $[H_2O]$ – концентрація води в розчині.

За недостатньої кількості гідроксид-іонів (OH^-) або гідрокарбонатів (HCO_3^-) у воді процес гідролізу коагулянтів відбувається неповністю. У таких умовах утворення малорозчинних гідроксидів алюмінію чи заліза сповільнюється, що знижує ефективність формування флокул і, відповідно, процесів освітлення та знебарвлення [1]. Для компенсації недостатньої лужності та підтримання оптимального рН технологічні схеми водопідготовки передбачають введення додаткових лужних реагентів. Найчастіше

застосовують гашене вапно ($Ca(OH)_2$), кальциновану соду (Na_2CO_3) або натрій гідроксид ($NaOH$), які забезпечують необхідну концентрацію OH^- для утворення об'ємних гідроксидних осадів у формі, придатній до флокуляції [2].

Це особливо важливо для малолужних вод із низькою буферною ємністю, що характерно для багатьох малопотужних річкових джерел. Практика підтверджує: навіть невеликі дозування вапна чи соди значно підвищують стійкість коагуляційного процесу та забезпечують формування щільніших і седиментаційно стійких пластівців [6–7].

Процеси гідролізу протікають поетапно з утворенням полігідроксокомплексів:



Температура води та рівень рН залишаються одними з ключових чинників, що визначають ступінь гідролізу коагулянтів, структуру та стабільність утворених флокул. Підвищення температури інтенсифікує гідроліз солей алюмінію та заліза, пришвидшує утворення гідроксокомплексів і сприяє формуванню щільніших пластівців, що позитивно впливає на швидкість осадження [1]. Навпаки, за низьких температур (нижче 8–10 °С) швидкість реакцій гідролізу істотно зменшується, агрегати формуються повільніше, а флокули набувають більш пухкої структури. Це знижує їхню седиментаційну стійкість і потребує адаптації технологічних режимів – підвищення дози реагентів, подовження часу відстоювання чи використання полімерних флокулянтів для стабілізації процесу [2–3].

Сучасні дослідження підтверджують, що температурний фактор має вирішальне значення для функціонування малопотужних систем водопідготовки, де, як правило, відсутня можливість впровадження повної автоматизації технологічних процесів. За низьких температур кінетика гідролізу коагулянтів сповільнюється, що знижує

швидкість формування та стабільність флокул. У таких умовах ефективним рішенням є застосування комбінованих технологічних схем, зокрема попереднього окиснення, введення модифікованих поліалюмінійхлоридів та використання аніонних поліелектролітів. Це дозволяє мінімізувати негативний вплив низьких температур, підвищити стійкість агрегатів і забезпечити стабільну якість очищеної води [8–9].

Особливу роль у процесах освітлення відіграє механізм гетероагрегації. У середовищі з обмеженим об'ємом, де розмір частинок не перевищує 1 мкм, вплив сил гравітації та інерції є незначним порівняно з дією міжмолекулярних сил прилипання та Ван-дер-Ваальсових взаємодій [1]. Це обумовлює підвищену ймовірність приєднання дрібнодисперсних частинок до поверхонь твердих субстратів (зернистого фільтрувального завантаження, стінок контактних камер, поверхні грубодисперсних флокул у відстійниках) порівняно з їх агрегацією між собою.

Зазначений механізм пояснює зростання ефективності сорбційної коагуляції та флокуляції за наявності великої питомої поверхні взаємодії. Використання високопористих матеріалів, таких як антрацит, кварцовий пісок, цеоліти чи гранульоване активоване вугілля, створює додаткові центри адсорбції та ініціює формування більш щільних і стійких агрегатів [2].

Крім того, доведено, що в умовах низької каламутності та підвищеної кольоровості, коли процеси гомоагрегації частинок відбуваються надзвичайно повільно, саме контакт із поверхнею флокул або зернистого завантаження визначає швидкість агрегації. Це дає підстави розглядати технології контактної коагуляції та сорбційної флокуляції як пріоритетні для малопотужних систем водопідготовки, що функціонують в умовах сезонної мінливості якісних показників води [3–4].

Особливої актуальності залежність ефективності коагуляції від рН набуває при очищенні води з малопотужних поверхневих

джерел. Такі води зазвичай характеризуються низькою мінералізацією, нестабільним хімічним складом і підвищеним вмістом природних органічних речовин (НОМ), зокрема гумусових сполук. У подібних умовах величина рН відіграє критичну роль у формуванні флокул та інтенсивності знезабарвлення [1].

Експериментально доведено, що у присутності фульвокислот і гумінових речовин оптимальний ефект коагуляції досягається при більш низьких значеннях рН (близько 5,0–6,0). Це пояснюється особливостями дисоціації карбоксильних і фенольних груп у структурі гумусових кислот: за зниженого рН ці групи залишаються протонованими, що сприяє електростатичній взаємодії з позитивно зарядженими іонами Al^{3+} [2–3]. Найчастіше у таких випадках застосовують сульфат алюмінію $(Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O)$, продукти гідролізу якого утворюють малорозчинний $Al(OH)_3$ з високою адсорбційною здатністю.

Практика показує, що за оптимального рН знезабарвлення води відбувається вже в перші хвилини після введення реагенту, тоді як при відхиленні від цього діапазону процес значно сповільнюється. Саме тому у технологічних схемах малопотужних систем водопідготовки рекомендується постійний контроль і регулювання рН із використанням коригувальних реагентів (вапна, соди або кислот) [8].

Хімічний склад вихідної води суттєво впливає на ефективність процесів коагуляції та флокуляції. Зокрема, підвищена концентрація гідрокарбонатів (HCO_3^-) і сульфатів (SO_4^{2-}) здатна збільшувати потребу в дозуванні коагулянтів через утворення комплексних сполук, що знижують активність гідроксидів металів. Встановлено, що негативний вплив сульфат-іонів може бути зменшений за рахунок введення катіонів кальцію (Ca^{2+}) , які стабілізують структуру флокул і розширюють оптимальний діапазон значень рН.

Температура води залишається одним із вирішальних факторів, що визначають кінетику коагуляційних процесів. За низьких температур ($<8-10$ °C) зростає в'язкість середовища, сповільнюється дифузія реагентів і рух колоїдних частинок, що призводить до зменшення частоти зіткнень і ослаблення адгезійних взаємодій. У результаті формуються менш щільні й механічно нестійкі осади з низькою седиментаційною здатністю. Подібні умови потребують як підвищення дози коагулянтів, так і оптимізації режимів гідравлічного перемішування для забезпечення рівномірного розподілу реагентів.

Додатковим ускладнювальним чинником є високий вміст водоростей, характерний для літнього періоду. Водорості здатні покривати поверхні мінеральних частинок, знижуючи їх осаджувальність, а також утворювати стійкі колоїдно-органічні комплекси. Для їх ефективного видалення необхідні комбіновані підходи до коагуляційної обробки, що включають попереднє окиснення (озон, перманганат калію, діоксид хлору) або застосування полімерних флокулянтів, які забезпечують руйнування біологічних структур і сприяють формуванню стійкіших агрегатів.

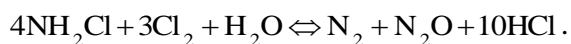
Наявність у воді значної кількості мікробіодоростей не лише ускладнює процеси освітлення, але й спричиняє зменшення густини коагуляційних флокул. Це пояснюється тим, що водорості здатні обволікати мінеральні частинки, змінюючи їхню поверхневу енергію та знижуючи седиментаційну здатність. Утворені колоїдно-органічні комплекси характеризуються меншою щільністю, що ускладнює їхнє осадження у відстійниках та потребує подовженого часу відстоювання або застосування додаткових технологічних методів, зокрема введення полімерних флокулянтів чи використання електрофлотації [5].

Ще одним важливим чинником, який визначає ефективність первинної обробки води, є вміст амонійного азоту (NH_4^+) та вільного аміаку (NH_3) . При введенні хлору

для цілей дезінфекції або попереднього окиснення відбувається їхня взаємодія з утворенням хлорамінів – вторинних продуктів хлорування. Ключове значення має співвідношення аміаку та активного хлору, оскільки воно визначає переважаючий тип і концентрацію хлорамінів (моно-, ди- чи трихлорамінів), кожен із яких характеризується різною дезінфекційною активністю та стабільністю.

Домінування хлорамінів у залишковій концентрації замість вільного хлору може мати негативний вплив на мікробіологічну безпеку та якість води в розподільчій мережі. Зокрема, зниження рівня вільного залишкового хлору ускладнює підтримання ефективної вторинної дезінфекції, особливо у водах з високим вмістом органічних домішок або в теплу пору року, коли посилюється активність біоплівки у трубопроводах.

Для забезпечення оптимальних характеристик хлорамінів (стабільності, відсутності стороннього запаху, належної дезінфекційної активності) зазвичай дотримуються співвідношення хлору до аміаку у межах 3:1–5:1 за масою. Відхилення від цього діапазону призводить до утворення надлишкових кількостей трихлорамінів, що відзначаються високим окиснювальним потенціалом, корозійною активністю та формуванням специфічного неприємного запаху у воді:

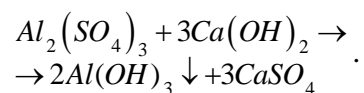
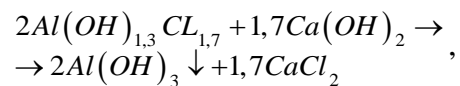


Протягом останніх десятиліть спостерігається інтенсивне зростання використання поліоксихлоридів алюмінію (ПОХА, англ. polyaluminum chloride, PAC) як високоефективних коагулянтів у технологіях очищення питної та стічної води. Ці реагенти, що мають узагальнену формулу $\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{(3n-m)}$, відзначаються підвищеним ступенем попереднього гідролізу, що забезпечує їм низку переваг у порівнянні з традиційними солями алюмінію, зокрема сульфатом алюмінію $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ [4].

Гідроліз поліоксихлоридів алюмінію супроводжується суттєво меншим споживанням лужного резерву води. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що на нейтралізацію кислотних продуктів гідролізу ПОХА витрачається майже вдвічі менше гідроксид-іонів (OH^-), ніж у випадку гідролізу сульфату алюмінію. Це означає, що ПОХА менш інтенсивно знижує рівень рН та загальну лужність, що є критично важливим для малолужних вод і вод із низькою буферною здатністю [7].

Завдяки високому ступеню попереднього гідролізу ПОХА утворює заряджені полімеризовані комплекси з вираженою адгезійною здатністю до колоїдних та органічних домішок. Це дозволяє зменшувати робочі дози реагентів на 20–30% порівняно з класичними коагулянтами без втрати ефективності, а в багатьох випадках – з її підвищенням. Крім того, знижується об'єм утвореного осаду, що оптимізує експлуатацію споруд водопідготовки та скорочує витрати на його зневоднення й утилізацію [6].

Практичні спостереження підтверджують, що застосування ПОХА забезпечує більш стабільний перебіг процесів коагуляції в умовах коливань рН, температури та мінералізації. Це особливо актуально для поверхневих вод із динамічним складом, де традиційні коагулянти потребують постійного коригування дози та жорсткого контролю кислотно-лужного балансу [8]:



Одним із ключових факторів, що визначає ефективність коагуляційної підготовки води, є співвідношення іонів гідроксилу до іонів алюмінію (OH^- , Al^{3+}). Цей параметр безпосередньо впливає як на склад і структуру гідролітичних продуктів, так і на перебіг рівноважних процесів у

вуглекислотній системі, що регулює значення рН та лужність водного середовища [7].

Особливістю поліоксихлориду алюмінію (ПОХА) є наявність у його складі гідроксильних груп, які частково нейтралізують іони водню, знижуючи кислотність розчину. Завдяки цьому використання ПОХА є особливо доцільним для обробки вод із низьким значенням рН та слабкою буферною здатністю. Така ситуація характерна, зокрема, для вод із високим вмістом мінеральної заварі або в умовах весняного паводку, коли спостерігаються підвищена мутність і нестабільні гідрохімічні показники.

Експериментальні випробування з використанням поліоксихлориду алюмінію торгової марки «ПАК-18» при загальній лужності 0,35–0,52 мг-екв/л та рН у межах 7,14–7,69 підтвердили: у порівнянні з сульфатом алюмінію (СА), ПОХА витрачає майже вдвічі менше лужного резерву на гідролізні реакції. Це зумовлює мінімальні коливання рН і практично не призводить до зниження лужності, що є надзвичайно важливим для роботи з водами, які мають обмежений буферний резерв. Таким чином, застосування ПОХА створює стабільні умови для подальших стадій технологічної обробки [9].

Водночас, у випадках високої мутності води за низької природної лужності, застосування лише ПОХА може бути недостатнім для забезпечення ефективної коагуляції. У таких умовах доцільним є комбіноване використання поліоксихлоридів алюмінію з полімерними флокулянтами. Залучення аніонних або неіоногенних полімерів (наприклад, поліакриламід) сприяє додатковій агрегації колоїдних частинок, формуванню більш щільних флокул, прискоренню процесів седиментації та підвищенню ефективності освітлення води [9].

Ефективність знезараження води при використанні поліоксихлориду алюмінію (ПОХА) зростає не лише завдяки інтенсифікації процесів коагуляції, але й через зменшення кількості мезофільних

аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів у 1,6–4,5 разів. Це має особливе значення для очищення забруднених поверхневих вод, де мікробіологічний чинник часто є критичним [6]. Додатковим позитивним ефектом є екзотермічний характер реакції розчинення ПОХА, що сприяє прискоренню формування флокул, особливо за низьких температур вихідної води.

Ще однією перевагою застосування ПОХА є утворення більшої кількості малорозчинних гідролізних продуктів, які слугують центрами агрегації та підвищують частоту зіткнень частинок, що покращує флокуляцію. У таких умовах у ряді випадків вдається уникнути попереднього підлучення води, що спрощує технологічну схему. До того ж, оптимальний діапазон рН для ефективної дії ПОХА є ширшим (приблизно 5,5–8,5), ніж у традиційних реагентів [8].

Останніми роками зростає інтерес до комбінованих і мультифункціональних коагулянтів, що поєднують у собі властивості декількох реагентів. Це можуть бути як промислові продукти міжнародних виробників (наприклад, PAX, ALG, AVR фірми Kemira), так і вітчизняні катионні флокулянти (КФ-45 та його модифікації), які демонструють високу ефективність у поєднанні з ПОХА [9].

Разом із тим, одним із головних обмежень залишається відносно висока вартість ПОХА, яка у 4–6 разів перевищує ціну сульфату алюмінію. Це значно стримує його широке впровадження у муніципальних системах водопідготовки. Крім того, у ряді випадків, зокрема для вод північно-західних регіонів України з високою кольоровістю, низькою мінералізацією та підвищеним вмістом органіки, ПОХА демонструє обмежену ефективність.

З метою мінімізації зазначених недоліків перспективним є комбіноване застосування сульфату алюмінію (СА) і ПОХА з роздільними точками введення в потік води. Такий підхід забезпечує синергетичний ефект: взаємодія сульфат-іонів (SO_4^{2-}) і хлорид-іонів (Cl^-) з коагулянтами дозволяє

підвищити ефективність видалення широкого спектру забруднень [9].

Незалежно від обраного реагенту, визначення оптимальної дози коагулянту можливе лише шляхом проведення лабораторних тестів – пробного коагулювання. Такий підхід має вирішальне значення для малопотужних систем водопостачання, оскільки їхні джерела характеризуються динамічними змінами якісних показників під впливом природних та антропогенних факторів.

Висновки

Аналіз наукових джерел та експериментальних даних свідчить, що ефективність коагуляційної обробки маломутних кольорових вод визначається комплексом фізико-хімічних чинників, серед яких ключову роль відіграють рН середовища, температура, буферна здатність та концентрація природних органічних речовин (гумінових і фульвокислот).

Доведено, що традиційні коагулянти (сульфат алюмінію, хлорид та сульфат заліза) демонструють високу ефективність лише у вузькому діапазоні рН (6,0–7,5 для алюмінієвмісних та 5,0–9,0 для залізовмісних реагентів) і при температурах вище 10 °С. В умовах низької лужності процеси гідролізу відбуваються неповністю, що знижує швидкість утворення флокул та їхню седиментаційну стійкість.

Встановлено, що використання модифікованих поліалюмінійхлоридів,

Al/Fe-композитів та наноструктурованих коагулянтів дозволяє розширити робочий діапазон рН та підвищити ефективність видалення природних органічних речовин за низьких температур. При цьому застосування полімерних флокулянтів (аніонних і катіонних) забезпечує формування щільних і стійких агрегатів навіть у водах із низькою мутністю та кольоровістю.

Отримані результати підтверджують доцільність комбінування коагулянтів нового покоління з методами попереднього окиснення (озонування, обробка діоксидом хлору чи перманганатом калію), що сприяє руйнуванню стійких гумусових комплексів і підвищує швидкість агрегації. Дослідження також показали, що за умов малопотужних систем водопідготовки застосування контактної коагуляції та сорбційної флокуляції із залученням високопористих матеріалів (антрацит, активоване вугілля, цеоліти) значно інтенсифікує процеси осадження й фільтрації.

Таким чином, результати роботи підтверджують, що полімерні та наноструктуровані коагулянти є ефективним інструментом для оптимізації процесів освітлення і знебарвлення маломутних кольорових вод, особливо в умовах малопотужних джерел із сезонною мінливістю якості води.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. John Bratby *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. London : IWA Publishing, 2016. ISBN 9781780407494.
2. Орлов В. О. *Технології підготовки питної води : навч.-метод. матер.* Рівне : НУВГП, 2016. 97 с.
3. Хільчевський В. К., Забокрицька М. Р., Стельмах В. Ю. *Гідроекологічні аспекти водопостачання та водовідведення : навч. посіб.* Київ : ДІА, 2023. 228 с.
4. Nailu T. et al. Application of enhanced coagulation in drinking water treatment for the removal of natural organic matter. *Water Supply*. 2025. Vol. 25, iss. 2. Pp. 303–314. DOI: 10.2166/ws.2025.021.
5. Yan M., Wang D., Ni J., Qu J., Chow C. Effect of pre-oxidation on coagulation of low-turbidity waters containing algae. *Water Research*. 2006. Vol. 40, iss. 8. Pp. 1517–1524. DOI: 10.1016/j.watres.2006.01.040.
6. Cui F., Lee S. H., Ngo H. H., Nghiem L. D. et al. Enhanced coagulation : a review of state-of-the-art and emerging applications. *Environmental Technology & Innovation*. 2020. Vol. 19. Pp. 100872. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100872.
7. Matilainen A., Vepsäläinen M., Sillanpää M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment : a review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010. Vol. 159. Pp. 189–197. DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.007.
8. Pernitsky D., Edzwald J. Selection of alum and iron coagulants for water treatment plants. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*. 2006. Vol. 55, № 2. Pp. 121–141.

9. Cui F., Lee S. H., Ngo H. H., Nghiem L. D. et al. Enhanced coagulation : a review of state-of-the-art and emerging applications. *Environmental Technology & Innovation*. 2020. Vol. 19. Pp. 100872. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100872.

REFERENCES

1. John Bratby Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. London : IWA Publishing, 2016. ISBN 9781780407494.
2. Orlov V.O. *Tekhnolohii pidhotovky pytnoi vody navch.-metod. materialy* [Technologies for the preparation of drinking water. Teaching and methodological materials]. Rivne : NUVHP, 2016, 97 p. (in Ukrainian).
3. Khilchevskiy V.K., Zabokrytska M.R. and Stelmakh V.Yu. *Hidroekolohichni aspekty vodopostachannia ta vodovidvedennia : navch. posib.* [Hydroecological aspects of water supply and drainage : teaching aids.]. Kyiv : DIA, 2023, 228 p. (in Ukrainian).
4. Hailu T. et al. Application of enhanced coagulation in drinking water treatment for the removal of natural organic matter. *Water Supply*. 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 303–314. DOI: 10.2166/ws.2025.021.
5. Yan M., Wang D., Ni J., Qu J. and Chow C. Effect of pre-oxidation on coagulation of low-turbidity waters containing algae. *Water Research*. 2006, vol. 40, iss. 8, pp. 1517–1524. DOI: 10.1016/j.watres.2006.01.040.
6. Cui F., Lee S.H., Ngo H.H., Nghiem L.D. et al. Enhanced coagulation : a review of state-of-the-art and emerging applications. *Environmental Technology & Innovation*. 2020, vol. 19, pp. 100872. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100872.
7. Matilainen A., Vepsäläinen M. and Sillanpää M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment : a review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010, vol. 159, pp. 189–197. DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.007.
8. Pernitsky D. and Edzwald J. Selection of alum and iron coagulants for water treatment plants. *Journal of Water Supply : Research and Technology – AQUA*. 2006, vol. 55, no. 2, pp. 121–141.
9. Cui F., Lee S.H., Ngo H.H., Nghiem L.D. et al. Enhanced coagulation : a review of state-of-the-art and emerging applications. *Environmental Technology & Innovation*. 2020, vol. 19, pp. 100872. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100872.

Надійшла до редакції: 04.01.2026.

УДК 378.091:005.591.6

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.89.1229

КОНЦЕПТУАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ СУЧАСНОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ

САВОШ Г. П., *канд. соціолог. наук*

Кафедра філософії, 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) 276-60-53, e-mail: savosh.halyna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3524-9645

Анотація. *Актуальність роботи* полягає у розгляді важливих концептуальних проблем сучасної освіти у контексті інтеграції педагогіки, соціології, психології. Особливу увагу приділено питанням формування особистості за умов цифровізації та глобальних трансформацій суспільства. **Мета дослідження** – визначити вплив сучасних форматів навчання на реалізацію місії, цілей та якості освіти; дослідити роль глобалізації та диджиталізації в освітньому процесі, необхідність розвитку емоційного інтелекту та критичного мислення у учнів; запропонувати розуміння сучасної інноваційної освіти як породження та освоєння об'єктивного нового культурного досвіду. **Результати.** Автор вважає, що глобалізація економіки та технологічний розвиток змінили вимоги до якості людського капіталу та зробили затребуваними висококваліфікованих працівників у професіях, що ґрунтуються на знаннях. Це стало серйозним викликом до традиційної системи освіти, побудованої за принципами індустріального суспільства. Підкреслюється роль глобалізації та диджиталізації в освітньому процесі, необхідність розвитку емоційного інтелекту та критичного мислення у учнів. Запропоновано розуміння сучасної інноваційної освіти як породження та освоєння об'єктивного нового культурного досвіду. Якісна освіта, що забезпечує рівність можливостей система освіти може сприяти економічному зростанню та прогресу суспільства. Три групи факторів – технологічні, соціально-економічні, демографічні – визначають основні завдання, заходи та типи політики, що реалізуються у провідних країнах світу у сфері освіти. І Україна – не виняток. Перехід від традиційних методів до цифрових освітніх середовищ, використання нейромереж для адаптивного навчання ставить питання збереження ролі педагога. Персоналізація вимагає пошуку балансу між необхідністю дотримання стандартів освіти та вимогою індивідуального підходу до темпу та траєкторії навчання кожного учня. Концепція «навчання через все життя» вимагає перебудови системи освіти від разового здобуття професії до постійного оновлення навичок (micro-credentials). Забезпечення освіти, спрямованої на розвиток особистості потребує формування цінностей та соціальної відповідальності, незважаючи на технологізацію процесу. Ці виклики вимагають перегляду самої структури дидактики, переходу від передачі знань до формування компетенцій у світі, що швидко змінюється.

Ключові слова: *проблеми освіти; формування особистості; цифрове освітнє середовище; парадигма сучасної освіти; освітній процес; форми навчання; цифровізація освіти*

CONCEPTUAL OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF MODERN EDUCATION IN UKRAINE

SAVOSH G.P., *Cand. Sc. (Social.)*

Department of Philosophy, 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) 276-60-53, e-mail: savosh.halyna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3524-9645

Abstract. *The relevance of the work* lies in considering important conceptual problems of modern education in the context of the integration of pedagogy and psychology. Particular attention is paid to the issues of personality formation in the context of digitalization and global transformations of society. **The purpose of the study** is to determine the impact of modern learning formats on the implementation of the mission, goals and quality of education; investigate the role of globalization and digitalization in the educational process, the need to develop emotional intelligence and critical thinking in students; offer an understanding of modern innovative education as the generation and development of objective new cultural experience. **Results.** The author believes that economic globalization and technological development have changed the requirements for the quality of human capital and made highly skilled workers in knowledge-based professions in demand. This has become a serious challenge to the traditional education system built on the principles of industrial society. The role of globalization and digitalization in the educational process, the need to develop emotional

intelligence and critical thinking in students is emphasized. An understanding of modern innovative education as the generation and mastery of objective new cultural experience is proposed. A high-quality, equitable education system can contribute to economic growth and progress in society. Three groups of factors – technological, socio-economic, demographic – determine the main tasks, measures, and types of policies implemented in the world's leading countries in the field of education. And Ukraine is no exception. The transition from traditional methods to digital educational environments, the use of neural networks for adaptive learning raises the question of preserving the role of the teacher. Personalization requires finding a balance between the need to comply with educational standards and the requirement of an individual approach to the pace and trajectory of each student's learning. The concept of “lifelong learning” requires restructuring the education system from one-time acquisition of a profession to constant updating of skills (micro-credentials). Providing education aimed at personal development requires the formation of values and social responsibility, despite the technologization of the process. These challenges require a review of the very structure of didactics, a transition from the transfer of knowledge to the formation of competencies in a rapidly changing world.

Keywords: *educational problems; personality formation; digital educational environment; paradigm of modern education; educational process; forms of learning; digitalization of education*

Вступ. Освіта – це цілеспрямована пізнавальна діяльність людей, які бажають отримати знання та навички або вдосконалити їх. Вона призначена для того, щоб надавати новому поколінню початкові знання культури, формуючи поведінку у дорослому житті і допомагаючи у виборі можливої ролі у суспільстві. Навчання прискорює процес розвитку й становлення людини як особистості, забезпечує формування її духовності, світогляду, ціннісних ідей.

Функціональне її призначення полягає у трансляції базових культурних здобутків наступним поколінням, що зумовлює моделі їхньої соціальної поведінки та професійну самоідентифікацію. Освітній процес виступає каталізатором особистісного становлення, сприяючи системному формуванню духовно-світоглядних орієнтирів та ціннісної ієрархії індивіда. Саме освіта забезпечує культурну спадкоємність, готуючи молодь до виконання соціальних ролей у дорослому віці. Через інтенсифікацію процесів розвитку навчання стає підґрунтям для формування духовності, світогляду та стійкої системи ціннісних переконань особистості.

Вирішення завдання забезпечення високої якості освіти в Україні сьогодні поставлено у центр наукових досліджень та практичних експериментів, основною метою яких є пошук детермінант забезпечення цієї якості, її індикаторів та показників.

Сьогодні наукові пошуки та практична апробація в Україні зосереджені на розв'язанні проблеми забезпечення якісних

показників освіти. Основна увага дослідників спрямована на ідентифікацію чинників впливу, а також на формування репрезентативної системи показників, що відображають стан і динаміку освітньої галузі.

Саме тому у сучасних умовах на перше місце у забезпеченні якості освіти виходить людський фактор. Саме використання унікального потенціалу особистості, її удосконалення завдяки різноманітним технологіям, інноваційному знанню можуть стимулювати подальший розвиток освіти [1].

У цьому контексті особливої ваги набуває людський фактор. Максимальна реалізація потенціалу особистості через залучення інноваційних знань та сучасних технологій стає визначальною умовою для подальшого прогресу вітчизняної освітньої галузі [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблеми освіти посідають гідне місце у сучасних дослідженнях освіти. Так, серед вчених, які зверталися до питань якості освіти, зокрема з процесуальної точки зору, дослідження факторів ефективності навчання тощо можна назвати В. І. Добриніна, Г. М. Серікова, Т. М. Кухтевича, Т. О. Лукіну, О. А. Марущенко, О. В. Семенову, О. Л. Сидоренка, В. Г. Харчева, Ф. Е. Шерегу тощо. Загальні питання трансформації, модернізації та реформування вітчизняної освітньої сфери ґрунтовно вивчаються такими дослідниками як: В. І. Астахова, В. С. Бакіров, Л. М. Герасіна, В. Гуров, Г. Е. Зборовський, О. М. Козлова,

О. І. Ляшенко, К. Г. Михайлова, О. І. Навроцький, Є.А. Подольська, А. І. Субетто, С. О. Шаронова та інші. Якість освіти розглядається ними також як відповідність державному стандарту. Підхід до якості освіти з точки зору компетентнісної моделі, яка спирається на міждисциплінарні вимоги до результату освітнього процесу, розробляється С. Є. Шишовим. Запровадженню інноваційних підходів до моніторингу рівнів досягнень компетенцій присвячено роботи О. І. Локшиної, О. В. Овчарук, О.Л. Сидоренка тощо.

Ю. Олізько вважає, що реалізації усіх дидактичних принципів навчання сприяє міждисциплінарний підхід. Пошуком шляхів урізноманітнення та збільшення відкритості навчального матеріалу за допомогою нових технологій займалися такі вітчизняні вчені: В. Ю. Биков, О. Г. Глазунова, С. Г. Литвинова, О. В. Співаковський. На думку С. У. Гончаренко перед сучасною педагогікою стоять чотири основні завдання: збереження «культурної спадщини» традиційної педагогіки; створення «нової педагогіки», яка б відповідала сучасним реаліям і вимогам до освіти. О. А. Дубасенюк виявлено основні загальні закони протікання інноваційного процесу в освітньому середовищі. Аналізом цифрових компетенцій громадян і формулюванням ряду пропозицій щодо забезпечення їх готовності до використання сучасних цифрових можливостей займався Т. В. Запорожець.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика розвитку освітньої галузі є фундаментальним складником сучасного наукового дискурсу. Питання забезпечення якості освіти, зокрема її процесуальні аспекти та чинники ефективності навчання, ґрунтовно висвітлені у працях таких науковців, як В. І. Добринін, Г. М. Серіков, Т. М. Кухтевич, Т. О. Лукіна, О. А. Марущенко, О. В. Семенова, О. Л. Сидоренко, В. Г. Харчев та Ф. Е. Шерега.

Концептуальні засади трансформації, модернізації та системного реформування

національного освітнього простору досліджуються у роботах В. І. Астахової, В. С. Бакірова, Л. М. Герасіної, В. Гурова, Г. Е. Зборовського, О. М. Козлової, О. І. Ляшенка, К. Г. Михайлової, О. І. Навроцького, Є. А. Подольської, А. І. Субетто та С. О. Шаронової. У межах їхніх підходів категорія «якість освіти» нерідко інтерпретується через призму відповідності державним стандартам.

Окрему увагу в науковій літературі приділено інноваційним векторам розвитку:

– *Компетентнісний підхід*: С. Є. Шишов розробляє теоретичну модель якості освіти, що базується на міждисциплінарних вимогах до результатів навчання. Питання моніторингу рівнів набуття ключових компетенцій відображені у працях О. І. Локшиної, О. В. Овчарук та О. Л. Сидоренка.

– *Міждисциплінарність та відкритість*: Ю. Олізько обґрунтовує доцільність міждисциплінарного підходу для повноцінної реалізації дидактичних принципів. Шляхи розширення доступу до навчального матеріалу та впровадження новітніх технологій вивчають В. Ю. Биков, О. Г. Глазунова, С. Г. Литвинова та О. В. Співаковський.

– *Педагогічна трансформація*: С. У. Гончаренко акцентує на необхідності балансу між збереженням класичної культурної спадщини та розбудовою «нової педагогіки», адаптованої до сучасних реалій. Водночас О. А. Дубасенюк розкриває загальні закономірності перебігу інноваційних процесів в освітньому середовищі.

– *Цифровізація*: Питання формування цифрової грамотності населення та готовності громадян до оперування сучасними технологічними можливостями є предметом аналізу Т. В. Запорожця.

Актуальність дослідження. Освіта в Україні трансформується від авторитарної до дитиноцентричної системи, яка намагається адаптуватися до екстремальних викликів, забезпечуючи стійкість та якість навчання. Тому вкрай необхідно визначити важливі концептуальні проблеми сучасної освіти у

контексті інтеграції педагогіки, психології та соціології. Україна сьогодні стоїть на порозі трансформацій, щоб реалізувати довгострокову програму свого розвитку як складової частини демократичного світу. Цей процес відбувається в умовах повномасштабної війни, що ставить перед освітою багато викликів. У цьому контексті питання нової якості освіти набуває особливого значення, адже саме освіта є фундаментом побудови нової України. І хоча в нашій країні є важливі документи, які стосуються цього питання, але не існує єдиної концепції національної освіти, яка б могла визначити, на яких концептуальних засадах має будуватися освіта. Це обумовлює актуальність обраної нами теми наукової роботи та спонукає до подальшого дослідження даної проблеми.

Дискусійність та багатогранність окресленої проблематики детермінують актуальність нашого дослідження, спрямованого на комплексний аналіз і пошук нових шляхів оптимізації освітнього процесу.

Мета дослідження: визначити вплив сучасних форматів навчання на реалізацію місії, цілей та якість освіти; обґрунтувати характер впливу новітніх форматів навчання на ефективність реалізації місії та стратегічних цілей освітнього процесу, а також на забезпечення його якісних показників; дослідити роль глобалізації та диджиталізації в освітньому процесі, необхідність розвитку емоційного інтелекту та критичного мислення у учнів; запропонувати розуміння сучасної інноваційної освіти як породження та освоєння об'єктивного нового культурного досвіду.

Виклад основного матеріалу дослідження. Освіта – це комплекс навчально-виховних психолого-педагогічних, науково-просвітницьких, культурологічних та методичних заходів. Відзначимо, що саме стрімкий розвиток науки і освіти у минулому столітті сприяв зростанню промисловості й інших галузей економіки, забезпечив підґрунтя для практичного застосування та впровадження

технічних інновацій, зокрема перехід до постіндустріального, а згодом і до інформаційного суспільств. Проте, це призвело і до появи низки досить серйозних проблем. Система світу певною мірою консервативна і не дуже гнучка, вона не встигає за динамічними змінами зовнішнього середовища. А отже, не в змозі адекватно відповідати вимогам сьогодення, викликам часу, іншими словами, повністю задовольнити вимоги соціуму. Зрозуміло, що за цих умов виникає необхідність розробки, прийняття та реалізації науково виваженої державної політики удосконалення системи освіти.

Освіта трактується як системна сукупність навчально-виховних, психолого-педагогічних, науково-просвітницьких, культурологічних та методичних заходів. Історичний аналіз засвідчує, що інтенсивний розвиток науково-освітньої сфери у минулому столітті став фундаментом для індустріального прогресу та економічного зростання, забезпечивши умови для впровадження технічних інновацій і транзиту до постіндустріального та інформаційного суспільств. Водночас цей процес супроводжувався виникненням низки системних суперечностей. Сучасна освітня система характеризується певним консерватизмом та інституційною інертністю, що обмежує її здатність оперативно адаптуватися до динамічних трансформацій зовнішнього середовища. Як наслідок, виникає дисбаланс між актуальними запитами соціуму та реальною спроможністю освіти відповідати викликам часу. Зазначене актуалізує необхідність розробки та імплементації науково обґрунтованої державної стратегії, спрямованої на комплексну модернізацію освітньої галузі.

Якість освіти на практиці багато в чому визначається загальним освітнім контекстом, а питання виміру та визначення якості освіти ґрунтується на системі відповідності функціям та цілям, які покладено суспільством на інститут освіти. Загальноприйнятими вважаються три групи таких функцій: інституціональні, структурні,

предметно-сутнісні. Ефективність їхнього виконання безпосередньо впливає на якість освіти [2].

Реалізація параметрів якості освіти значною мірою обумовлена специфікою загального освітнього контексту та умов, у яких вона надається. Такий підхід вимагає розгляду якості не як статичної величини, а як динамічного результату взаємодії освітньої системи з її соціокультурним оточенням. При цьому методологія визначення якості базується на принципі відповідності результатів діяльності тим стратегічним функціям і цілям, які суспільство потребує від освіти. Ці завдання традиційно поділяють на три групи: інституційні, структурні та змістовні. Саме рівень ефективності їхньої реалізації виступає безпосереднім індикатором ефективності навчання та функціонування всієї освітньої системи в цілому [2].

Сучасна освіта стикається з фундаментальними концептуальними викликами, зумовленими глобалізацією, цифровізацією, швидкою зміною технологій та соціальними змінами. Ключовими викликами є перехід до персоналізованого навчання, впровадження штучного інтелекту, розвиток soft skills, перехід до безперервної освіти (Lifelong Learning) та необхідність гуманізації у цифровому середовищі [3].

Саме рішення цього кола проблем є вельми актуальним для сучасного українського суспільства, яке під впливом факторів глобалізації та інтернаціоналізації світового співтовариства прямує шляхом пошуку відповідних національних пріоритетів та форм і методів їх втілення у життя.

Розв'язання цих питань є надзвичайно важливим для сучасної України. Під впливом глобалізації та міжнародної інтеграції наша країна шукає власні національні пріоритети, а також ефективні способи їх впровадження в освітню практику.

Відповіді на поставлені суспільними трансформаціями завдання багато в чому залежать від типу особистості, який буде домінувати в українському суспільстві, від

тих рис та якостей, які складуть основу сучасних та майбутніх соціальних практик соціальних суб'єктів.

Ефективне вирішення завдань, що постають перед суспільством, залежить від того, якою буде особистість майбутнього. Саме риси та якості людей визначатимуть характер суспільних відносин і дій у найближчі роки

Сьогодні освітня парадигма змінилася. Основним протиріччям сучасної системи освіти є те, що швидке зростання знань у сучасному світі обмежене можливістю індивідуальної асиміляції. Ця суперечність змушує теорію викладання відмовитися від ідеї абсолютної освіти (повністю розвинутої особистості) на користь нового ідеалу - максимізувати розвиток людських здібностей, самодисципліни та самоосвіти [4].

Місія сучасної освіти полягає в тому, щоб створити соціальну стабільність і прогрес, відновити і розвинути культурні та людські ресурси країни. Загальна основа сучасної освітньої стратегії полягає в тому, щоб беззастережно визнати гуманістичну концепцію людини найвищою цінністю.

Стара система освіти не стикалася з багатьма проблемами, які стали актуальними в наш час. Однією з важливих тенденцій сучасної освіти є докорінна зміна ролі викладача. Педагог повинен розбиратися в сучасних тенденціях у сфері освіти. В іншому випадку він не зможе розробити правильну стратегію навчання.

Ця тенденція спостерігається в усьому світі. На даний момент викладач не є єдиним джерелом інформації. Учень може отримати знання за допомогою Інтернету. Там є величезна кількість підручників, лекцій, відеокурсів з різних предметів. Отже, змінюється і роль педагога. Тепер його найважливішим завданням є керівництво освітнім процесом. Вчитель повинен допомагати, підказувати і зацікавлювати учнів. Щоб залучити учня до самостійного вивчення матеріалу, педагогу потрібно дуже постаратися. Людина щодня стикається з величезною кількістю інформації, тому зацікавити її в отриманні якихось певних

знань досить важко. Ті методи навчання, які практикувалися раніше, зараз малоефективні. Викладачеві потрібно застосовувати нові технології та використовувати різні канали інформації. Отже, на перший план виступає впровадження в освітній процес цифрових технологій [5].

Через збільшення обсягу інформації, з яким стикається людина, особливого значення набуває навичка критичного мислення. Саме цьому повинен навчати педагог. Діти повинні звикнути до того, що будь-яку інформацію слід перевіряти. Необхідно навчити дитину працювати з джерелами даних. Учні потрібно ґрунтувати свою думку на фактах і логічних висновках. Для цього потрібно вміти фільтрувати зайву інформацію.

Чим швидше розвиваються технології, тим більше змінюється сприйняття дітей. Сучасній дитині вже не так цікаво читати книги і робити конспекти лекцій. Її приваблює візуальна, тактильна та аудіоінформація.

Діти люблять експерименти і інтелектуально-логічні ігри. Ці методи отримання знань набагато ефективніші, ніж традиційні. Урізноманітнити процес навчання можна за допомогою інтерактивних технологій, а також технологій віртуальної і доповненої реальності. У школах все частіше використовуються інтерактивні дошки та інтерактивні панелі, за допомогою яких можна візуалізувати різні процеси.

На даний момент немає необхідності в стандартизації всіх учнів під певний рівень. У сучасній системі освіти вже давно використовуються гнучкі підходи, адаптивне навчання та орієнтація на soft skills – мова йде про гнучкі навички, які не прив'язані до якоїсь певної спеціальності або предметної області. Це універсальні вміння, які стануть в нагоді будь-якій людині [6].

Адаптивне навчання – це метод навчання, при якому враховуються інтереси та сильні сторони кожної дитини. Рівень складності, темп і методи подачі матеріалів підбираються під конкретного учня. Якщо ті

чи інші предмети не викликають у дитини особливого інтересу, їх залишають на базовому рівні. Тут на перший план виходить практична сторона навчання. Чисто теоретичним знанням, які не пов'язані з реальним життям, відводиться менше часу. Дитина зосереджується на практичному освоєнні предметів і вчиться використовувати отриману інформацію в житті.

Змінюється і погляд на те, яким повинен бути випускник школи. Сучасні реалії вимагають, щоб він не тільки володів сумою знань з предмета, але і успішно використовував ці знання в різноманітних ситуаціях, умів і хотів вчитися все життя. Творча особистість повинна володіти інструментом для самоосвіти, самовиховання, володіти прийомами аналізу, синтезу, вміти робити висновки, міркувати.

Сучасні глобальні проблеми людства – це виклик сфері освіти, яка покликана коригувати свої пріоритети і цінності з урахуванням не тільки актуальних, але і перспективних довгострокових запитів і людини, і суспільства [7]. Стратегія освіти майбутнього – це поширення наукових фундаментальних знань, зміцнення престижу освіти, формування загального ринку знань і єдиного полікультурного освітнього простору. Цілком очевидно, що освіта майбутнього повинна бути різноманітною, адекватною культурному та етнічному різноманіттю людства, задовольняти всебічні потреби соціально-професійних груп, індивідуальні духовні запити.

У цих умовах зростає роль прогностичного моделювання полікультурного освітнього простору, як особливої соціальної практики, так і загальної культурно-історичної форми розвитку сутнісних сил людини і технологій її реформування [8].

Світова криза та сучасні суперечності стають серйозним випробуванням для освіти. Сьогодні вона змушена переглядати свої пріоритети, орієнтуючись не лише на поточні потреби людини та суспільства, а й на їхні перспективи у майбутньому [7]. План

розвитку, методологічний підхід та загальні цілі освіти майбутнього базуються на поширенні фундаментальних знань, підвищенні престижу навчання та формуванні єдиного світового освітнього простору. Така модель має бути різнобічною та враховувати культурне різноманіття людства. Її головна мета — гармонійно поєднувати професійну підготовку фахівців із духовними запитами кожної особистості. За таких обставин особливого значення набуває прогнозування розвитку багатокультурного освітнього середовища. Це не просто оновлення навчального процесу, а особливий шлях розкриття людського потенціалу та пошук нових методів модернізації всієї системи освіти [8].

Суспільство, яке перебуває в постійному розвитку, через освіту висуває людині і реалізує через неї нові вимоги, пов'язані з тенденціями і протиріччями нового ХХІ століття. До числа головних з них можна віднести [2; 4; 9]:

Сьогодні, у ХХІ столітті, у світі, який блискавично змінюється і виставляє все нові, чим далі складніші вимоги до людей, саме освіта повинна допомогти окремії і особистості, і суспільству в цілому якнайбезболісніше і якнайскоріше подолати існуючі протиріччя. Серед головних із них можна виділити такі [2; 4; 9]:

- здатність людини постійно підвищувати рівень знань, розробляти нові види діяльності, включаючи професійні знання;
- інтелектуальний і фізичний розвиток, щоб забезпечити освоєння нових технологій і підтримку здорового успіху;
- творчість, тобто творче мислення – це не тільки процес навчання, але і майбутня професійна діяльність;
- духовність, патріотизм, людяність і терпимість.

Характеристики сучасної освіти – це зміна парадигми навчання. Поява сучасної освіти, нових систем та методів навчального процесу призвели до нової концепції освіти. Це ставлення високо оцінюється інноваціями.

В інноваційному навчальному процесі необхідно виділити наступне [6]:

– перехід на нову українську школу (НУШ) – масштабну довгострокову реформу загальної середньої освіти, розпочату у 2018 році, що базується на дитиноцентризмі, партнерстві та компетентнісному підході, мета якої – створити комфортний простір, де діти отримують практичні навички для життя, вчать мислити критично;

– активне оновлення змісту загальної, середньої та професійної освіти на основі людських і гуманістичних ідей;

– динамічну модернізацію змісту всіх рівнів освіти на засадах гуманізму та поваги до особистості;

– забезпечення безперервності професійної освіти;

– реорганізація організаційних форм, методів навчання та виховання з урахуванням індивідуально-орієнтованих підходів;

– проведення управління якістю освіти на основі діагностики;

– впровадження викладачів і співробітників продовжує розвивати професійний розвиток;

– розвиток творчої ініціативи, професійної компетентності та педагогічної культури працівників системи освіти;

– підтримка використання творчого підходу та підвищення рівня майстерності викладачів, що дозволить їм працювати більш досконало, відповідно високому сучасному рівню.

Щодо розвитку вищої освіти, пріоритетними завданнями ЗВО стають не просто передача студентам готового набору актуальних і затребуваних на ринку праці знань, не тільки підготовка таких фахівців в будь-якій вузькій професійній галузі, які будуть добре навчені і матимуть хорошу теоретичну підготовку, але й навчання студентів уміння самостійно і швидко витягувати необхідну інформацію зі стрімко зростаючого обсягу даних, а також, що найголовніше, навчання їх уміння самостійно створювати знання.

Це видається можливим тільки в разі інтеграції навчальної та наукової сторін діяльності університетів, активізації інтересу

студентів до науки і творчого пошуку, розвитку їх креативних здібностей. Ще одним необхідним для студентів умінням стає вміння перетворювати інноваційні теоретичні знання в конкретні практичні розробки. Крім того, необхідно формувати у студентів вміння зробити свої знання та розробки привабливими для потенційних замовників, знайомити їх з тим, з чого складається вартість знань і науково-технічних розробок.

Глобалізація, як провідна тенденція сучасного розвитку, докорінно змінює зовнішнє середовище діяльності освітніх закладів, яким притаманні висока невизначеність, загальна взаємна зв'язність і гостра конкуренція. Розгляд викликів глобалізації та інформаційної революції є одним з головних завдань сучасних наукових досліджень. Адже система освіти визнана сьогодні найважливішою сферою існування суспільства знань і має постійно відповідати на різні вимоги мінливого світу та реагувати на будь-які трансформації економіки та суспільства. Безліч процесів, які відбуваються в усьому світі, характеризуються практично повною ідентичністю, що дає змогу трактувати їх з позиції глобалізації [7].

Глобалізація як домінантна парадигма сучасного цивілізаційного поступу спричиняє фундаментальну трансформацію умов функціонування освітніх інституцій. Сучасний освітній простір характеризується високим рівнем турбулентності, посиленням взаємозалежності суб'єктів та інтенсифікацією конкурентної боротьби на світовому ринку інтелектуальних послуг.

На сьогодні теоретичне осмислення викликів глобалізації та інформаційно-технологічної революції виступає пріоритетним вектором наукового дискурсу. Це зумовлено тим, що освітня система визнана стратегічним базисом «суспільства знань», що вимагає від неї високої адаптивності та здатності до швидкого на динамічні запити глобальної економіки. Уніфікація та гомогенізація соціокультурних і економічних процесів у світовому масштабі дозволяє ідентифікувати їх як цілісний

глобальний феномен, що безпосередньо корегує траєкторію розвитку національних систем освіти [7].

А щодо цих тенденцій у сфері освіти, то їх кількість досить обмежена через специфіку галузі застосування, що дає можливість їх класифікувати і виділити з більшою точністю. Основним рушієм прогресу і найбільшою цінністю у світі визнаються знання, тому система освіти кожної держави, яка прагне до поступального розвитку, повинна відповідати деяким загальним для всього світу вимогам, щоб відповідати тим умовам, які на освіту покладає і нова система економіки, і нова система міжнародного устрою, і потреби самої держави.

Попри масштабність глобальних трансформацій, кількість ключових тенденцій безпосередньо в освітній галузі є відносно обмеженою, що зумовлено інституційною специфікою цієї сфери. Це створює методологічні передумови для їх чіткої класифікації та верифікації з високим ступенем точності. У сучасній архітектоніці світового устрою знання ідентифікуються як основний детермінант прогресу та найважливіший стратегічний ресурс. Відповідно, національні освітні системи держав, що орієнтовані на траєкторію сталого поступу, мають відповідати уніфікованим глобальним стандартам. Така відповідність є необхідною для адаптації до вимог нової економічної парадигми, архітектури міжнародних відносин та внутрішніх соціодержавних пріоритетів

Світовий досвід цивілізаційного розвитку найбільш передових країн світу засвідчує вирішальну роль освітньої сфери в становленні всього соціокультурного комплексу – модернізації виробництва, вдосконалення суспільних відносин, науки і культури, які забезпечують сталий розвиток суспільства, входження індустріальних країн у стадію постіндустріального інформаційного суспільства.

Ретроспективний аналіз світового цивілізаційного досвіду провідних держав підтверджує стратегічну роль галузі освіти як фундаментального чинника розбудови

цілісного соціокультурного комплексу. Освіта виступає базовим інструментом модернізації технологічних укладів, оптимізації архітектури суспільних відносин, а також інтенсифікації наукового та культурного капіталу. Саме ефективне функціонування освітньої системи забезпечує парадигму сталого розвитку та стає ключовим чинником транзиту індустріальних країн до етапу постіндустріального інформаційного суспільства

У XXI столітті роль освіти для всіх країн ще більше зростає, виступаючи вирішальним чинником конкурентоспроможності країни на світовій арені. Саме освіта є інструментом впливу на ментальні цінності та пріоритети людей з урахуванням інтересів довгострокової і поточної соціальної практики. Саме освіта відчуває основні виклики глобалізації, оскільки сучасна соціальна реальність, сприйняття якої характеризується в найзагальнішому вигляді крахом системи цінностей, відсутністю жорстко структурованих нормативних моделей, потребує нових орієнтирів. Освіта, у якій фіксується стійке, яке само потім транслюється в розвитку, інтуїтивно розуміється як якоесь «рятувальне коло», і саме тому освіта сьогодні стає об'єктом пильної уваги як з боку суспільства, так і з боку науки.

У XXI столітті стратегічна значущість освітньої галузі масштабується, трансформуючись у ключову визначальну умову, яка робить будь-яку державу успішною на світовому ринку. Освіта виступає потужним інструментом трансформації світоглядної основи, ціннісних орієнтацій та пріоритетів індивіда, адаптуючи їх до вимог як поточної соціальної практики, так і довгострокових векторів розвитку.

Саме освітня сфера першою реагує на дестабілізуючі виклики глобалізації. Сучасна соціальна реальність, що характеризується ерозією традиційних етичних систем та деструкцією жорстко структурованих нормативних моделей, породжує гострий дефіцит нових смислових орієнтирів. У

цьому контексті освіта постає як фундаментальна основа соціальної стабільності – своєрідний центр стабілізації, що забезпечує неперервність соціокультурної трансляції. Це пояснює перетворення освітньої проблематики на об'єкт інтенсивної міждисциплінарної уваги як з боку академічної спільноти, так і з боку суспільних інститутів.

Тому в світі починаються пошуки більш ефективної освітньої політики і здійснюється перехід до гнучких високотехнологічних освітніх систем на основі застосування сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. У суспільстві з інноваційною економікою важливе значення надається «виробництву знань» та працівнику, що застосовує ці знання. Завдання останнього – не тільки використовувати наявні знання, а й брати участь у виробництві нових знань на робочому місці, сприяючи зростанню ефективності своєї діяльності. Відповідно, змінюється і зміст освітнього процесу. Замість того щоб бути джерелом знань, викладач тепер повинен виступати в ролі керівника та організатора процесу навчання.

Глобальна динаміка зумовлює інтенсифікацію пошуку високоефективних моделей освітньої політики, що проявляється у переході до гнучких, високотехнологічних екосистем навчання, інтегрованих у цифровий простір. У парадигмі інноваційної економіки домінантна роль відводиться процесам «генерації знань», де людський капітал виступає не лише споживачем, а й активним суб'єктом когнітивного виробництва.

Сучасний фахівець має володіти компетенціями не лише з експлуатації існуючих інформаційних масивів, а й брати безпосередню участь у продукуванні нових знань безпосередньо в операційному середовищі, що стає ключовим фактором підвищення професійної ефективності. У зв'язку з цим відбувається радикальна трансформація архітектоники освітнього процесу: роль педагога еволюціонує від ретранслятора інформації до модератора, модератора та архітектора індивідуальних освітніх траєкторій.

Очевидно, що реакцією на ці виклики повинна стати трансформація соціальних інститутів, а освіта як інститут випереджального розвитку фактично створює парадигмальні основи глобалізованого буття. До тенденцій розвитку освіти у глобалізованому світі відносять такі:

- зростання значення освіти як фактора соціального розвитку в якості провідника знань та інформації;

- диференціацію джерел фінансування, перехід до широкого спектру джерел фінансування та отримання прибутку, підвищення ефективності використання коштів;

- інтернаціоналізацію освіти, уніфікацію, що необхідна для стандартизації та визнання дипломів;

- зміну вимог до змісту, методів та форм навчального процесу;

- зміну організаційних форм освітньої діяльності;

- глобалізацію ринку освітніх послуг [8; 10].

Концептуальною відповіддю на зазначені виклики стає фундаментальна трансформація соціальних інститутів. У цьому контексті освіта, як інститут випереджального розвитку, детермінує основні принципи існування людини в умовах глобалізованого буття. Аналіз сучасних векторів розвитку освітньої сфери дозволяє виокремити такі ключові тенденції:

- зростання ролі освіти як головного провідника та чинника соціального поступу, що забезпечує безперервну трансляцію інформаційних та когнітивних ресурсів;

- диверсифікація фінансових моделей: перехід до багатоканального фінансування, пошук альтернативних джерел прибутку та оптимізація механізмів бюджетної ефективності;

- уніфікація освітніх стандартів, спрямована на забезпечення академічної мобільності та конвертованості національних дипломів у світовому просторі;

- трансформація дидактичної парадигми: радикальне оновлення наповнення, інструментарію та форматів

організації освітнього процесу згідно з вимогами часу;

- структурно-організаційна реконфігурація: впровадження інноваційних форм управління та реалізації освітньої діяльності;

- експансія глобального ринку освітніх послуг: посилення транскордонної конкуренції та формування єдиного світового ринку інтелектуального капіталу [8; 10].

По суті, поняття «глобалізація освіти» означає процес входження освітньої системи в європейську зону вищої освіти і стандартизацію вимог: порівнянність ступенів, єдину систему залікових балів, академічну мобільність, оцінку якості освіти. Супутніми чинниками процесу глобалізації стають стрімкий розвиток експорту освітніх послуг та навчання іноземних студентів, у тому числі дистанційне навчання засобами Інтернету, розвиток транснаціональної освіти, подолання національних кордонів і стирання мовних бар'єрів. У цьому випадку головний виклик глобалізації – загроза втрати національної ідентичності країн на «користь» космополітизму, стандартизації, уніфікації традиційних культур в умовах інформаційної нерівності [11].

У вузькому дискурсі концепт «глобалізація освіти» це створення єдиних «правил гри» для університетів різних країн (насамперед у Європі). Це робиться для того, щоб навчання за кордоном стало простішим, а дипломи визнавалися всюди.

Основні інструменти цієї системи:

- спільні стандарти: запровадження зрозумілих усім ступенів (бакалавр, магістр) та системи оцінювання (кредити ECTS);

- свобода пересування: можливість для студентів та викладачів навчатися або стажуватися в інших країнах (академічна мобільність);

- контроль якості: спільні вимоги до того, наскільки добре університет навчає своїх студентів.

Ці зміни відбуваються не самі по собі. Їх стимулюють:

- освіта як бізнес: країни активно «продають» свої освітні послуги іноземцям;

- цифрові технології: навчання через інтернет, онлайн-курси та хмарні платформи дозволяють вчитися в іноземному виші, не виходячи з дому.

Але, попри всі плюси, у глобалізації є зворотний бік. Коли все стає однаковим і стандартизованим, виникають небезпеки: втрата ідентичності: національні традиції навчання та унікальні наукові школи можуть розчинитися в загальних світових стандартах; культурна одноманітність: світ стає «однаковим», де глобальні тренди витісняють місцеву культуру; цифрова прірва: країни з гіршим доступом до технологій опиняються в програшному становищі, що лише посилює нерівність у світі [11].

Таким чином, глобалізація робить освіту зручною та сучасною, але головне завдання сьогодні – прийняти світові стандарти, не втративши при цьому власну культуру та наукові здобутки.

Ведучи мову про функції освіти, ми можемо особливо відзначити у цьому плані функцію соціалізації. Справа у тому, що потреби соціуму, його розвиток та особливості функціонування залежать від соціальної стратифікації даного суспільства. І зрозуміти динаміку процесів змін в середині кожної соціальної групи та кожного соціального прошарку можливо лише за умови врахування фактору соціальної мобільності, який ці процесу відображає. Формування та розбудова нової соціальної реальності неможлива без участі системи освіти. Слід відзначити, що входження у суспільство та адаптація молодої людини може бути зручним та безболісним за умов формування людської особистості на основі залучення індивіда до численних цінностей, накопичених соціумом. А це може відбуватися і за допомогою цілеспрямованого виховання, і шляхом знаходження цінностей у процесі отримання знань.

Аналізуючи ключові функції освіти, особливу увагу слід приділити соціалізації особистості. Соціум є складною системою з певною структурою, де розвиток кожної групи залежить від можливостей соціальної

мобільності. Саме освіта виступає головним «соціальним ліфтом», що відображає динаміку переміщень індивідів між різними прошарками суспільства.

Розбудова сучасної соціальної реальності неможлива без активної участі освітніх інституцій. Процес інтеграції та адаптації молоді в суспільне середовище відбувається найбільш гармонійно, коли особистість формується на основі загальноприйнятих соціокультурних цінностей. Цей процес реалізується двома шляхами: через цілеспрямований виховний вплив та через самостійне засвоєння етичних і культурних норм у процесі опанування науковими знаннями.

Бурхливий розвиток сучасних комп'ютерних технологій дає змогу практично необмежено накопичувати й обробляти інформацію, кількість якої зростає лавиноподібним чином, а також практично миттєво передавати її з будь-якого куточка світу в інший. У зв'язку з цим виникає проблема відбору й використання потрібної інформації та відкидання непотрібної і навіть шкідливої. Крім того, сучасні інформаційні технології стрімко проникають у всі сфери діяльності людства, і жоден працівник вже не може обійтись без їх використання. Усі ці фактори поставили серйозні виклики перед системою освіти, яка без відповідного реформування вже не може забезпечити суспільні потреби в якості освіти підростаючого покоління [3; 5].

Стрімкий розвиток комп'ютерних технологій дозволяє накопичувати та обробляти величезні масиви даних, обсяг яких постійно зростає. Завдяки глобальній мережі інформація поширюється миттєво, що створює проблему інформаційної фільтрації. Сьогодні важливо не просто знайти дані, а вміти відібрати корисну інформацію та відсіяти зайвий або шкідливий контент.

Загальна цифровізація змінює вимоги до професій: володіння інформаційними технологіями (ІКТ) тепер є обов'язковою умовою для будь-якої діяльності. Ці чинники формують комплекс викликів для освітньої системи. Без системного

реформування та впровадження інноваційних моделей навчання вона втрачає здатність адекватно задовольняти суспільний запит на якісну підготовку молоді в умовах постіндустріального світу [3; 5].

По-перше, стає зрозумілим, що за короткий період навчання в загальноосвітній школі чи вищому навчальному закладі не можна навчити всьому, що буде потрібно молодій людині в подальшому житті в швидкозмінному соціумі, а тому потрібно навчити вчитися. По-друге, необхідно формувати творчу самодостатню особистість, яка б легко пристосовувалась до постійних змін і безболісно їх сприймала. По-третє, освіта має сприяти мобільності тих, хто навчається, формувати в них здатність спілкуватися з представниками інших народів, уміння жити і співпрацювати з ними, терпимість до інших поглядів і переконань. По-четверте, необхідно не тільки долучати школярів та студентів до інформаційних технологій, а й формувати в них інформаційну культуру, уміння знаходити необхідну корисну інформацію і відкидати шкідливу, здатність використовувати потрібну інформацію для свого самовдосконалення та суспільних потреб. Тож педагог має постійно засвоювати і реалізовувати все нові й нові можливості сучасних інформаційних технологій.

Аналіз сучасних освітніх викликів дозволяє виокремити кілька стратегічних пріоритетів:

1. В умовах швидкої зміни соціуму традиційні знання швидко застарівають, тому ключовим завданням стає формування навички «навчатися впродовж життя» (lifelong learning).

2. Необхідно розвивати креативну та адаптивну особистість, здатну конструктивно сприймати динамічні зміни та ефективно функціонувати в умовах невизначеності.

3. Освіта має забезпечувати соціальну та академічну мобільність, формуючи толерантність, культуру міжнаціонального

спілкування та навички командної співпраці у глобальному середовищі.

4. Важливо виходити за межі простого володіння гаджетами, формуючи цілісну інформаційну культуру. Це передбачає критичне мислення, вміння фільтрувати дані та використовувати їх для особистісного та суспільного розвитку.

Реалізація цих завдань вимагає від педагога безперервного професійного вдосконалення та активного впровадження інструментарію НІТ у навчальний процес.

Висновки

Отже, сучасна система освіти переживає глибокі трансформації, спричинені глобалізацією, цифровізацією та зміною соціально-економічних умов. Ці процеси впливають зміст і методи навчання, психологічний розвиток особистості. Педагогічна, психологічна, соціологічна наука сьогодні мають виконувати подвійне завдання: адаптуватися до викликів сучасності та одночасно пропонувати ефективні стратегії формування цілісної, стійкої та конкурентоспроможної особистості.

До числа найбільш значущих концептуальних проблем належать:

1. *Проблема збереження особистісного підходу.* Традиційна педагогіка виходила з необхідності індивідуального підходу до навчання. В умовах масової освіти і стандартизованих програм цей принцип все частіше втрачається. Особистість учня нерідко сприймається як об'єкт засвоєння інформації, а не як суб'єкт освітнього процесу, що призводить до зниження мотивації і розвитку апатії.

2. *Діджиталізація освіти та її психологічні наслідки.* Хоча цифрові технології розширюють доступ до інформації, створюють нові форми навчання (наприклад, змішане навчання, онлайн-курси, віртуальні симуляції), вони провокують зростання інформаційного перевантаження, зниження концентрації уваги та формування мозаїчності та фрагментарності сприйняття інформації у учнів. У цих умовах актуальним завданням

стає розвиток навичок саморегуляції та критичного аналізу інформації.

3. *Нерівність в освітніх можливостях*. Розвиток цифрових платформ не завжди супроводжується рівним доступом до ресурсів. Існує проблема «цифрового розриву» між регіонами, школами і сім'ями. Це тягне за собою соціально-психологічне розшарування і посилює освітню нерівність.

Сучасна школа та університет мають не лише передавати знання, а й формувати стійкі ціннісні орієнтири. В умовах глобалізації, культурної відкритості та постійної зміни соціальних норм стає

особливо важливо розвивати в учнів здатність до усвідомленого вибору та відповідальної поведінки. Концептуальні виклики освіти неможливо вирішити виключно силами педагогіки. Потрібна інтеграція психології, соціології, медицини та інформаційних технологій. Такий міждисциплінарний підхід дозволить не тільки підвищити ефективність навчання, а й створити умови для формування гармонійно розвиненої особистості, здатної адаптуватися до світу, що швидко змінюється.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойченко М. Освіта у модусі критичного мислення : шлях подолання контраверсійності. *Історія та філософія освіти в незалежній Україні : контрверзи сучасного наукового пізнання : зб. тез всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю* (8 червня 2021 р.). Київ : Інститут педагогіки НАПН України, 2021. С. 186–189.
2. Левкулич В. (Вища освіта у дзеркалі викликів та альтернатив сучасності. *Філософія освіти*. 2022. № 28 (1). С. 139–158. URL: <https://doi.org/10.31874/2309-1606-2022-28-1-8>
3. Андріяш В. І. Державна етнополітика України в умовах глобалізації : монографія. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2013. 328 с.
4. Кравченко А. Філософська парадигма освітніх вимог smart-суспільства. *Smart-освіта : ресурси та перспективи : матер. III Міжнар. наук.-метод. конф.* (Київ, 7 грудня 2018 р.) : тези доп. Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2018. С. 167–170.
5. Медведовська О. Впровадження цифрових технологій в освітній процес в Україні. *Наукові записки ЦДПУ ім. В. Винниченка. Серія : Педагогічні науки*. 2021. В. 198. С. 132–136.
6. Дубасенюк О. Інноваційні освітні технології та методики в системі професійно-педагогічної підготовки. *Професійна педагогічна освіта : інноваційні технології та методики*. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2009. С. 14–47.
7. Воронкова В. Теоретико-методологічні засади розвитку сучасного соціуму в контексті синергетичної глобалізації. *Гуманітарний вісник ЗДІА*. 2012. № 50. С. 21–34.
8. Бондаренко Н. Освітнє середовище : єдність форми та змісту. *Вища освіта України*. 2023. № 4. С.40–49. URL: [https://doi.org/10.32782/NPU-VOU.2023.4\(91\).06](https://doi.org/10.32782/NPU-VOU.2023.4(91).06)
9. Хромець В. Концепції інакшої освіти для України : Візія якісної освіти майбутнього. Український інститут майбутнього. 2025. URL: <https://uifuture.org/publications/konczepczija-inakshoyi-osvity-dlya-ukrayiny-viziya-yakisnoyi-osvity-majbutnogo/#:~:text=Віталій%20Хромець%20переконаний%3A%20необхідно%20було.школа%20повинна%20підтримувати%20персоналізовану%20освіту>
10. Олізько Ю. Міждисциплінарний підхід як засіб реалізації основних дидактичних принципів навчання. *Педагогічний дискурс*. 2015. Вип. 18. С. 161–165.
11. OECD. Education at a Glance 2023 : OECD Indicators. Paris : OECD Publishing, 2023.

REFERENCES

1. Boychenko M.I. *Osvita u modusi krytychnoho myslennya : shlyakh podolannya kontraversiynosti* [Education in the mode of critical thinking : a way to overcome controversy]. *Istoriya ta filosofiya osvity v nezalezhniy Ukraini : kontroverzy suchasnoho naukovoho piznannya : zb. tez vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi z mizhnarodnoyu uchastyu (8 chervnya 2021)* [History and Philosophy of Education in Independent Ukraine : Controversies of Modern Scientific Knowledge : collection of abstracts of the All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation (June 8, 2021)]. Kyiv : Institute of Pedagogy of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine, 2021, pp. 186–189. (in Ukrainian).
2. Levkulych V. *Vyshcha osvita u dzerkali vyklykiv ta al'ternatyv suchasnosti* [Higher education in the mirror of challenges and alternatives of modernity]. *Filosofiya osvity* [Philosophy of Education]. 2022, no. 28 (1), pp. 139–158. URL: <https://doi.org/10.31874/2309-1606-2022-28-1-8> (in Ukrainian).
3. Andriyash V. *Derzhavna etnopolityka Ukrayiny v umovakh hlobalizatsiyi : monohrafiya* [State ethno-policy of Ukraine in the context of globalization : monograph]. Mykolayiv : Publishing House of Petro Mohyla Black Sea State University, 2013, 328 p. (in Ukrainian).

4. Kravchenko A. *Filosofs'ka paradyhma osvity v umovy smart-suspil'stva* [Philosophical paradigm of educational requirements of smart society]. *Smart-osvita : resursy ta perspektyvy : materialy III Mizhnar. nauk.-metod. konf. (Kyiv, 7 hrudnya 2018 r.) : tezy dopovidey* [Smart Education : Resources and Prospects : materials of the III International s-methodological conference (Kyiv, December 7, 2018) : abstracts]. Kyiv : Kyiv National University of Trade and Economics, 2018, pp. 167–170. (in Ukrainian).

5. Medvedovska O.H. *Vprovadzhennya tsyfrovyykh tekhnolohiy v osvityi protses v Ukraini* [Implementation of digital technologies in the educational process in Ukraine]. *Naukovi zapysky TSDPU im. V. Vynnychenka. Seriya : Pedagogichni nauky* [Scientific notes of the Central State University named after V. Vynnychenko. Series : Pedagogical Sciences]. 2021, iss. 198, pp. 132–136. (in Ukrainian).

6. Dubasenyuk O.A. *Innovatsiyni osvityi tekhnolohiyi ta metodyky v systemi profesiyno-pedahohichnoyi pidhotovky. Profesiyna pedahohichna osvita : innovatsiyni tekhnolohiyi ta metodyky : monohrafiya* [Innovative educational technologies and methods in the system of professional and pedagogical training. Professional pedagogical education : innovative technologies and methods : monograph]. 2009, pp. 14–47. (in Ukrainian).

7. Voronkova V. *Teoretyko-metodolohichni zasady rozvytku suchasnoho sotsiumu v konteksti synerhetychnoyi hlobalizatsiyi* [Theoretical and methodological principles of the development of modern society in the context of synergistic globalization]. *Humanitarnyy visnyk ZDIA* [Humanitarian Bulletin Zaporizhzhia State Engineering Academy]. 2012, no. 50, pp. 21–34. (in Ukrainian).

8. Bondarenko N. *Osvitnye seredovyshe : yednist' formy ta zmistu* [Educational environment : unity of form and content]. *Vyshcha osvita Ukrainy* [Higher Education of Ukraine]. 2023, no. 4, pp. 40–49. URL: [https://doi.org/10.32782/NPU-VOU.2023.4\(91\).06](https://doi.org/10.32782/NPU-VOU.2023.4(91).06) (in Ukrainian).

9. Khromets' V. *Kontseptsiyi inakshoyi osvity dlya Ukrainy : Vizyya yakisnoyi osvity maybutn'oho* [Concepts of a different education for Ukraine : a vision of quality education of the future.] *Ukrayins'kyi instytut maybutn'oho* [Ukrainian Institute of the Future]. 2025. URL: <https://uifuture.org/publications/konceptsiya-inakshoyi-osvity-dlya-ukrainy-vizyya-yakisnoyi-osvity-majbutnogo/#:~:text=Віталій%20Хромець%20переконаний%3A%20необхідно%20було,школа%20повинна%20підтримувати%20персоналізовану%20освіту> (in Ukrainian).

10. Olizko Yu. *Mizhdystsyplinarnyy pidkhid yak zasib realizatsiyi osnovnykh dydaktychnykh pryntsyviv navchannya* [Interdisciplinary approach as a means of implementing the main didactic principles of education]. *Pedahohichnyy dyskurs* [Pedagogical Discourse]. 2015, iss.18, pp. 161–165. (in Ukrainian).

11. OECD. *Education at a Glance 2023 : OECD Indicators*. Paris : OECD Publishing, 2023.

Надійшла до редакції: 22.02.2026.

УДК 681.3:681.5.017

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.103.1230

ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ПАСИВНИХ СИСТЕМ ПОЖЕЖОГАСІННЯ НА МАЙДАНЧИКАХ АЕС

СЄДІН В. Л.¹, *докт. техн. наук, проф.*,

УЛЬЯНОВ В. Ю.^{2*}, *ас.*,

КОВБА В. В.^{3*} *канд. техн. наук, доц.*,

ЗАГІЛЬСЬКИЙ В. А.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,

БЕКІРОВ В. О.⁵, *асп.*,

ЛАПКО Р. В.⁶, *асп.*

¹ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: sedin.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

^{2*} Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: uljanovvu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9028-3408

^{3*} Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

⁴ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: zahilskiy.vitalii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

⁵ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: bekirov.veli@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-6123-5943

⁶ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: lapko.roman@365.pdaba.edu.ua, ORCID 0009-0009-4899-6090

Анотація. Постановка проблеми. У статті обґрунтовується необхідність доповнення існуючих систем пасивної безпеки на атомних електростанціях новою системою пасивного пожежогасіння. Новою системою пасивного пожежогасіння можуть бути обладнані як АЕС, що розташовані в рівнинній зоні, так і АЕС, які розташовані у гірських умовах. Особливістю запропонованої системи є можливість самоплинного характеру подачі води на майданчик АЕС. Запропонована пасивна система протипожежної безпеки (ПСПБ АЕС) може стати ще одним додатковим захисним бар'єром, який підвищує експлуатаційну надійність АЕС, що може бути особливо актуальним у світлі поточної політичної, економічної та військової ситуації. **Мета статті.** Мета роботи полягає у обґрунтуванні необхідності доповнення існуючих пасивних систем безпеки АЕС новою автономною системою пасивного пожежогасіння, здатною підвищити рівень протипожежного захисту майданчика. Також передбачається визначення технічних рішень щодо розміщення, конструкції та принципів функціонування такої системи з урахуванням геоморфологічних та інженерно-геологічних умов майданчиків АЕС. **Висновки.** Особливістю запропонованої системи є можливість самоплинного характеру подачі води на майданчик АЕС шляхом ручного відкриття засувки на пожежних трубопроводах. Приклади розміщення самоплинних систем подачі води для гасіння пожеж на майданчиках АЕС авторам цієї статті невідомі. Таким чином, запропонована пасивна система протипожежної безпеки (ПСПБ АЕС) може стати ще одним додатковим захисним бар'єром, який підвищує експлуатаційну надійність АЕС, що може бути особливо актуальним у світі поточної політичної, економічної та військової ситуації. В умовах перехідного між рівнинним та гірським рельєфом, розміщення такої системи економічно доцільніше, хоча й вимагатиме проведення додаткових розрахунків, у т.ч. як стійкості ґрунтів самого майданчика під резервуар, так і стійкості схилів. Самі елементи системи пасивного пожежогасіння, в т.ч. естакади під трубопроводи, як і їх фундаменти, є переважно типовими і не становитимуть жодних складнощів при проектуванні та зведенні.

Ключові слова: АЕС; експлуатація; пасивні системи безпеки; системи пожежогасіння

ON THE NEED TO IMPLEMENT PASSIVE FIRE SUPPRESSION SYSTEMS AT NUCLEAR POWER PLANT SITES

SEDIN V.L.¹ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
ULYANOV V.Yu.^{2*} *Ass.*,
KOVBA V.V.^{3*} *Ph. D., Assoc. Prof.*,
ZAHILSKYI V.A.⁴ *Ph. D., Assoc. Prof.*,
BEKIROV V.O.⁵ *Postgrad. Stud.*,
LAPKO R.V.⁶ *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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: sedin.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

^{2*} Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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: ulanovvu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9028-3408

^{3*} Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

⁴ Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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: zahilskiy.vitalii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

⁵ Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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: bekirow.veli@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-6123-5943

⁶ Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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: lapko.roman@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0009-4899-6090

Abstract. Problem statement. The article justifies the need to supplement existing passive safety systems at nuclear power plants with a new passive fire extinguishing system. Both NPPs located in the plain zone and NPPs located in mountainous conditions can be equipped with a new passive fire extinguishing system. A feature of the proposed system is the possibility of self-flowing water supply to the NPP site. The proposed passive fire safety system (PSPB NPP) can become another additional protective barrier that increases the operational reliability of the NPP, which may be especially relevant in light of the current political, economic and military situation. **The purpose of article.** The purpose of the work is to justify the need to supplement the existing passive safety systems of NPPs with a new autonomous passive fire extinguishing system capable of increasing the level of fire protection of the site. It is also planned to determine technical solutions for the location, design and principles of operation of such a system, taking into account the geomorphological and engineering-geological conditions of the NPP sites. **Conclusions.** A feature of the proposed system is the possibility of self-flowing water supply to the NPP site by manually opening the valves on the fire pipelines. The authors of this article are not aware of examples of placement of self-flowing water supply systems for extinguishing fires at NPP sites. Thus, the proposed passive fire safety system (PPFS NPP) can become another additional protective barrier that increases the operational reliability of the NPP, which may be especially relevant in the current political, economic and military situation. In conditions of transition between flat and mountainous terrain, placement of such a system is economically more expedient, although it will require additional calculations, including both the stability of the soil of the site itself under the tank and the stability of the slopes. The elements of the passive fire extinguishing system themselves, including the overpasses for pipelines, as well as their foundations, are mostly typical and will not pose any difficulties in design and construction.

Keywords: *NPP; operation; passive safety systems; fire extinguishing systems*

Постановка проблеми. За умови нормальної експлуатації атомні електричні станції не становлять небезпеки для персоналу, населення та навколишнього середовища, проте, як джерело небезпеки АЕС розглядаються лише в аварійних ситуаціях. Тому, при проектуванні завчасно

визначаються технічні заходи, створені для запобігання чи обмеження наслідків аварій. Для цього використовуються спеціальні системи безпеки.

Положення сучасної концепції безпеки АЕС відображені у документах МАГАТЕ та передбачаються до реалізації національними

нормативно-законодавчими та нормативно-технічними документами [1–5].

Одним із факторів небезпеки є промислові пожежі, тому в даній роботі обґрунтовується необхідність доповнення існуючих систем пасивної безпеки на АЕС новою системою пасивного пожежогасіння. Пасивна система протипожежної безпеки (ПСПБ АЕС) може стати ще одним додатковим захисним бар'єром, який підвищує експлуатаційну надійність АЕС [6–11].

Мета статті. Мета роботи полягає у обґрунтуванні необхідності доповнення існуючих пасивних систем безпеки АЕС новою автономною системою пасивного пожежогасіння, здатною підвищити рівень протипожежного захисту майданчика. Також передбачається визначення технічних рішень щодо розміщення, конструкції та принципів функціонування такої системи з урахуванням геоморфологічних та інженерно-геологічних умов майданчиків АЕС.

Матеріали та методи. Для забезпечення багаторівневого захисту передбачаються системи активної та пасивної безпеки. Активні системи безпеки залежать від джерел енергії. Пасивні системи безпеки працюють за допомогою природних процесів без участі персоналу. Серед пасивних систем безпеки АЕС широко відомі:

- система пасивного відведення тепла від захисної оболонки;
- система пасивного відведення тепла через парогенератори;
- система швидкого введення бору.

Крім перерахованих вище систем пасивної безпеки, важлива роль на майданчиках АЕС відводиться і протипожежним системам. Крім систем внутрішнього протипожежного захисту енергоблоків використовуються і системи зовнішнього протипожежного захисту. Традиційно для гасіння пожеж, особливо зовнішніх, на території АЕС чинним нормативами передбачено окремий протипожежний водопровід тиску, на зовнішніх мережах якого встановлено пожежні гідранти.

Гасіння зовнішніх пожеж передбачено також шляхом подачі води від пересувної пожежної техніки. Забір води пожежними автомобілями передбачений від джерел водопостачання, що є на майданчику, для чого до них передбачені під'їзні шляхи та розворотні майданчики. Однак у певних умовах існуючих систем може виявитися недостатньо. А доступ пересувних пожежних автомобілів до місць загоряння чи забору води обмежений. Також при пошкодженні енергопостачання можуть вийти з ладу системи створення та підтримання тиску у протипожежному трубопроводі.

Для підвищення безпеки стандартна система пожежогасіння на АЕС може і має бути додатково доповнена системою пасивного типу (умовна назва – ПСПБ АЕС). Звичайно, якщо це дозволяють геоморфологічні та гідрогеологічні умови майданчика АЕС [10; 11].

Результати досліджень. Система пасивного типу може функціонувати автономно і бути резервною для підживлення стаціонарної системи пожежогасіння у разі масштабних пожеж на АЕС.

До складу обладнання запропонованої системи пасивного пожежогасіння повинні входити ємності для води або спеціальної рідини разом з трубопроводами. Ємності для води, за типом нафтових резервуарів, розташовуються значно вище майданчиків АЕС і пов'язані з ними трубопроводами на естакадах (по одному на кожен енергоблок або через проміжний пункт загальностанційного перенаправлення потоків). Перепад висот повинен забезпечувати самоплинну подачу води до об'єктів на майданчику АЕС з необхідним тиском та можливістю ручного відкриття всіх засувок.

Живлення електричною енергією необхідного насосного обладнання призначене лише для поповнення ємностей. Джерелами води можуть бути водоймища (в окремих випадках, і морські акваторії) та свердловини. Об'єм в баках ПСПБ АЕС повинен забезпечувати подачу необхідної кількості води при масштабних загораннях

одночасно у кількох точках майданчика. Орієнтовно на один енергоблок об'єм такого резервуара може становити не менше 1 200–1 500 м³, тобто максимальний обсяг резервуару для АЕС із 6 енергоблоків буде не менш 10 000 м³.



Рис. 1. Зведення резервуарів на ДСП «Чорнобильська АЕС»

Так, у 2016 р. на майданчику об'єкту «Укриття» ДСП «Чорнобильська АЕС» чеською фірмою «Kohimex, spol. s r.o.» було споруджено два сталеві пожежні резервуари об'ємом 1 648 м³ кожен (корисний об'єм 1 530 м³) (рис. 1.).

При розташуванні АЕС у районах з помірним кліматом необхідно передбачити обігрів трубопроводів та ємностей. В аридних регіонах – уповільнювати або запобігати випаровуванню рідини з ємностей (на кшталт термоізоляції морських суден-газовозів ЗПГ).

Особлива увага стосовно вимоги якості металу приділяється ємностям та трубопроводам.

Технології спорудження таких резервуарів добре відпрацьовані. Як правило, ємності об'ємом до 10 000 м³ виготовляються «рулонним» способом. Для

цього металеві листи зварюють в одне велике полотно, згортають у рулон і везуть на будмайданчик. Там його встановлюють на підготовлений фундамент, розгортають і з'єднують за допомогою зварювання. Позитивний ефект такого методу – скорочення обсягу зварювальних робіт на майданчику до 80 %. Трубопроводи виконуються із вуглецевої сталі. Арматура – загальнопромислова фланцева, також виготовлена з вуглецевої сталі.

Елементи системи вбудовуються в систему пожежогасіння, проте енергозабезпечення та управління повністю автономні від станційних джерел.

Ідеальний варіант, виходячи з рельєфу місцевості, де це можливо здійснити – АЕС «Фламанвіль» у Франції (рис. 2). Подібні сприятливі умови мають АЕС (рис. 3) «Ембальсе» (Аргентина), АЕС ім. адмірала Алваро Алберто (Бразилія), АЕС «Тяньвань» (Китай) та інші.



Рис. 2. Рельєф майданчика АЕС «Фламанвіль»



Рис. 3. Рельєф АЕС «Ембальсе» (Аргентина)

Багато АЕС, що розташовані в подібних геоморфологічних умовах, також можуть бути обладнані такою системою. У рівнинних умовах, у яких переважно розташовані АЕС України, це зробити набагато складніше, проте цілком можливо.

Для цього необхідний хоч і відносно невеликий, але все ж таки перепад висот поблизу майданчиків АЕС. Саме такий перепад висот є на майданчику Запорізької АЕС, для якої ще до військових дій Придніпровською державною академією будівництва та архітектури (ПДАБА), а нині навчально-науковий інститут «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технології (ННІ ПДАБА УДУНТ), у ініціативному порядку, було виконано попереднє концептуальне рішення принципової можливості розміщення зазначеної системи.

Важливим питанням є вибір та підготовка основи для розміщення споруди. Для скельних основ (враховуючи рельєф місцевості) треба звертати особливу увагу на фізичний склад скельних ґрунтів та тектонічні особливості майданчика. Також, повинні бути (за можливості) виключені будь-які блокові зрушення у зонах виявлених тектонічних порушень. З цією метою мають бути проведені стандартні і спеціальні дослідження скельних та умовно пухких дисперсних ґрунтів.

Окремим питанням є вибір типу фундаменту для даної споруди, розташувати яку необхідно на максимально високих позначках рельєфу. Якщо на скельних ґрунтах завдання значно спрощується, то на пухких ґрунтах фундаменти ємностей великого об'єму конструктивно складніші та досить дорогі. Самі ж естакади під трубопроводи, як і їхні фундаменти, є переважно типовими та не будуть представляти жодних складнощів при проєктуванні та зведенні.

Розміщення резервуарів системи пасивного пожежогасіння може бути в комплексі з баштовими градирнями. Баштові градирні використовуються в системі оборотного водопостачання АЕС України,

зокрема на Рівненській і Запорізькій АЕС. Також баштовими градирнями планувалося обладнати Чорнобильську АЕС при своєму розширенні до шести блоків (що не відбулося).

Нагріта вода через водорозподільну систему градирні надходить на зрошувальний пристрій. Градирня є необслуговуваним приміщенням та постійних робочих місць на градирнях немає.

Розробка системи оповіщення та управління евакуацією людей під час пожежі для градирні не потрібна. Захищати градирню автоматичними установками пожежної сигналізації або автоматичними установками пожежогасіння раніше не вимагалось. Однак, як з'ясувалося під час ведення бойових дій, градирні все ж таки схильні до пожеж, особливо в період тривалих перерв в роботі (рис. 4). З цієї причини градирні також потребують протипожежного захисту.



Рис. 4. Пожежа на баштовій градирні Запорізької АЕС

Баштові градирні АЕС необхідно обладнати автоматичними установками пожежної сигналізації та автоматичними установками пожежогасіння. Резервною ємністю для води може служити басейн у нижній частині градирні.

Висновки

Особливістю запропонованої системи є можливість самоплинного характеру подачі води на майданчик АЕС шляхом ручного відкриття засувки на пожежних трубопроводах. Приклади розміщення самоплинних систем подачі води для гасіння

пожеж на майданчиках АЕС авторам цієї статті невідомі.

Таким чином, запропонована пасивна система протипожежної безпеки (ПСПБ АЕС) може стати ще одним додатковим захисним бар'єром, який підвищує експлуатаційну надійність АЕС, що може бути особливо актуальним у світі поточної політичної, економічної та військової ситуації. В умовах перехідного між рівнинним та гірським рельєфом,

розміщення такої системи економічно доцільніше, хоча й вимагатиме проведення додаткових розрахунків, у т.ч. як стійкості ґрунтів самого майданчика під резервуар, так і стійкості схилів. Самі елементи системи пасивного пожежогасіння, в т.ч. естакади під трубопроводи, як і їх фундаменти, є переважно типовими і не становитимуть жодних складнощів при проектуванні та зведенні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fire Safety in the Operation of Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.1. Specific Safety Guides. Vienna, 2000. 43 p.
2. Safety of Nuclear Power Plants : Commissioning and Operation. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/2 (Rev. 1). Specific Safety Requirements. Vienna, 2016. 47 p.
3. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Вид. офіц. Київ : Український науково-дослідний інститут цивільного захисту УкрНДІЦЗ, 2017. 41 с.
4. ВБН В.1.1-034-2003 (НАПБ 03.005-2002, ГНД 34.03.307-2004, ВБН В.1.1-034-03.307-2003). Протипожежні норми проектування атомних електростанцій з водо-водяними енергетичними реакторами. [Чинний від 2003-12-25]. Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», 2023.
5. Protection against internal fires and explosions in the design of nuclear power plants. No. SSG-46. IAEA Guidelines. Vienna, 2008. 85 p.
6. Хвалін Д. І. Підвищення безпеки атомних електростанцій шляхом запобігання пожегам і вибухам у машинному залі. *Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику : зб. тез VI Міжнар. конф.* (26–27 вересня 2024 року, м. Київ). Під заг. ред. К. В. Сімейка, А. Н. Носовського, Д. А. Лавренова. Київ, 225 с.
7. Monideep Dey Assuring fire safety in nuclear plants with international standards. *Nuclear Engineering and Design*. November 2024. Vol. 428.
8. Bertrand R., Bonneval F., Mattéi J.M. Fire probability safety analysis in France for 900 MWe nuclear power plants. *Kerntechnik*. 2000. № 65 (2). Pp. 111–114.
9. Zuo Jiaxua, Shi Qiangb, Li Juana, Fu Zhiweia, Song Weia, Chen Jiayunc, Zhang Chunminga, Chai Jianshea. The Performance-Based Fire Protection in the Nuclear Power Plant Design. *Procedia Engineering*. 2012. № 43. Pp. 318–323.
10. Седін В. Л., Ульянов В. Ю., Ковба В. В. Про необхідність впровадження пасивних систем пожежогасіння на АЕС. *Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику : зб. тез VI Міжнар. конф.* (26–27 вересня 2024 року, м. Київ). Київ, 2024. 225 с.
11. Bekirov V., Ulyanov V., Kovba V. The use of sites of coal-fired thermal power plants in Ukraine for the placement of nuclear power plants of various capacities. *Безпека жттедіяльності в XXI столітті : XIX Всеукр. студ. наук.-практ. конф.*(м. Дніпро, 27–28 квітня 2023 р.). Дніпро : ПДАБА, 2023. С. 9–10.

REFERENCES

1. Fire Safety in the Operation of Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.1. Specific Safety Guides. Vienna, 2000, 43 p.
2. Safety of Nuclear Power Plants : Commissioning and Operation. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/2 (Rev. 1). Specific Safety Requirements. Vienna, 2016, 47 p.
3. *DBN V.1.1-7:2016. Pozhezhna bezpeka ob`yektiv budivnictva. Zagalni vimogi. Chinnij vid 2017-06-01. Vid. ofic.* [DBN V.1.1-7:2016. Fire safety of construction sites. General requirements. Effective from 2017-06-01. Official edition]. Kiyiv : Ukrayinskij naukovno-doslidnij institut civilnogo zahistu UkrNDICZ, 2017, 41 p. (in Ukrainian).
4. *VBN V.1.1-034-2003 (NAPB 03.005-2002, GND 34.03.307-2004, VBN V.1.1-034-03.307-2003). Protipozhezni normi proektuvannya atomnih elektrostancij z vodo-vodyanimi energetichnimi reaktorami. Chinnij vid 2003-12-25 [VBN V.1.1-034-2003 (NAPB 03.005-2002, MND 34.03.307-2004, VBN V.1.1-034-03.307-2003). Fire safety standards for the design of nuclear power plants with water-water power reactors. Effective from 2003-12-25]. Kiyivskij naukovno-doslidnij ta proektно-konstruktorskij institut “Energoprojekt”, 2023. (in Ukrainian).*
5. Protection against internal fires and explosions in the design of nuclear power plants. No. SSG-46. IAEA Guidelines. Vienna, 2008, 85 p.
6. Hvalin D.I. *Pidvishennya bezpeki atomnih elektrostancij shlyahom zapobigannya pozhezham i vibuham u mashinnomu zali. Perspektivi vprovadzheniya innovacij u atomnu energetiku : zbirnik tez VI Mizhnarodnoyi konferenciyi*

(26–27 veresnya 2024 roku, m. Kiyiv). *Pid zagalnoyu redakciyeyu K.V. Simejka, A.N. Nosovskogo, D.A. Lavrenova* [Improving the safety of nuclear power plants by preventing fires and explosions in the engine room. Prospects for the Introduction of Innovations in Nuclear Power : collection of abstracts of the VI International conference (September 26–27, 2024, Kyiv). Under the general editorship of K.V. Simeiko, A.N. Nosovsky, D.A. Lavrenova]. Kyiv, 225 p. (in Ukrainian).

7. Monideep Dey Assuring fire safety in nuclear plants with international standards. *Nuclear Engineering and Design*. November 2024, vol. 428.

8. Bertrand R., Bonneval F. and Mattéi J.M. Fire probability safety analysis in France for 900 MWe nuclear power plants. *Kerntechnik*, 2000, no. 65 (2), pp. 111–114.

9. Zuo Jiaxua, Shi Qiangb, Li Juana, Fu Zhiweia, Song Weia, Chen Jiayunc, Zhang Chunminga and Chai Jianshea. The Performance-Based Fire Protection in the Nuclear Power Plant Design. *Procedia Engineering*. 2012, no. 43, pp. 318–323.

10. Syedin V.L., Ulyanov V.Yu. and Kovba V.V. *Pro neobhidnist vprovadzhennya pasivnih sistem pozhezhogasinnya na AES. Perspektivi vprovadzhennya innovacij u atomnu energetiku : zbirnik tez VI Mizhnarodnoyi konferenciyi (26–27 veresnya 2024 roku, m. Kiyiv)* [On the need to implement passive fire extinguishing systems at nuclear power plants. Prospects for the Introduction of Innovations in Nuclear Power : collection of abstracts of the VI International conference (September 26–27, 2024, Kyiv)]. Kyiv, 225 p. (in Ukrainian).

11. Bekirov V., Ulyanov V. and Kovba V. The use of sites of coal-fired thermal power plants in Ukraine for the placement of nuclear power plants of various capacities. *Bezpeka zhttyediyalnosti v HHI stolitti : XIX Vseukrayinska studentska naukovo-praktichna konferenciya* [Life Safety in the 21st century : XIX All-Ukrainian student scientific and practical conference]. 2023, Dnipro : PSACEA, pp. 9–10. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 03.02.2026.

УДК 351:338.2/365

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.110.1231

КОНЦЕПЦІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ BIM-ТЕХНОЛОГІЙ В УПРАВЛІННІ ДЕВЕЛОПЕРСЬКИМИ ПРОЄКТАМИ : ТЕОРЕТИЧНІ ПАРАДИГМИ

ФІСУНЕНКО П. А.¹, *докт. екон. наук, доц.*,
СОПІЛЬНЯК А. М.², *канд. техн. наук, доц.*,
БОРОДІН М. О.^{3*}, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра девелопменту нерухомості, фінансів, обліку та маркетингу, 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) 724-96-31, e-mail: fisunenko.pavlo@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1339-5860

² 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 (067) 724-96-31, e-mail: sopilniak.artem@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3067-0529

^{3*} 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 (067) 724-96-31, e-mail: borodin.maksym@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0513-3876

Анотація. У матеріалах наукового дослідження висвітлено проблематику формування ефективної концепції впровадження будівельного інформаційного моделювання в управлінні девелоперськими проєктами, проаналізовано відмінності між впровадженням будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) та стандартними технологіями 2D CAD, 3D CAD при управлінні девелоперськими проєктами. Сформовано основоположні складові розробки ефективної концепції впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проєктами, а саме: масштабність, стратегічне орієнтування, поділ на етапи реалізації девелоперського проєкту. У процесі дослідження були використані такі загальнонаукові та прикладні методи дослідження: аналізу і синтезу, дедукції та індукції – у процесі вибору відмінностей між впровадженням BIM-технологій та стандартними технологіями при управлінні девелоперськими проєктами; систематизації та узагальнення – у процесі проведення аналізу досліджуваного питання серед груп науковців як в Україні, так і закордоном; монографічні методи – для поглибленого дослідження поставлених завдань; абстрактно-логічні методи – для теоретичного узагальнення результатів дослідження і формулювання висновків та пропозицій. Результати дослідження мають практичне значення для вітчизняних та закордонних бізнес-аналітиків, підприємців. Отримані результати відтворюють пріоритетні постулати для формування комплексу заходів у напрямку дослідження аспектів розробки ефективної концепції впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проєктами. Оригінальність наукового дослідження полягає в обґрунтуванні спектру сучасних бізнес-рішень в сфері управління девелоперськими проєктами, систематизації управлінських процесів, що обумовлює відтворення стратегічних орієнтирів ревіталізації економіки України.

Ключові слова: *BIM-технології; будівельне інформаційне моделювання; прогнозування; цифровізація; бізнес-рішення; девелоперський проєкт; управління*

CONCEPT OF IMPLEMENTING BIM-TECHNOLOGIES IN DEVELOPMENT PROJECT MANAGEMENT : THEORETICAL PARADIGMS

FISUNENKO P.A.¹, *Dr. Sc. (Econom.), Assoc. Prof.*,
SOPIILNIAK A.M.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BORODIN M.O.^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Real Estate Development, Finance, Accounting and Marketing, 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) 724-96-31, e-mail: fisunenko.pavlo@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1339-5860

² 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 (067) 724-96-31, e-mail: sopilniak.artem@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3067-0529

^{3*} 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 (067) 724-96-31, e-mail: borodin.maksym@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0513-3876

Abstract. The materials of the scientific research highlight the issues of forming an effective concept for implementing building information modeling in the management of development projects, analyze the differences between the implementation of building information modeling (BIM-technologies) and standard 2D CAD, 3D CAD technologies in the management of development projects. The fundamental components of developing an effective concept for implementing BIM-technologies in the management of development projects have been formed, namely: scale, strategic orientation, division into stages of the development project implementation. The following general scientific and applied research methods were used in the research process: analysis and synthesis, deduction and induction – in the process of selecting the differences between the implementation of BIM-technologies and standard technologies in the management of development projects; systematization and generalization – in the process of analyzing the research question among groups of scientists both in Ukraine and abroad; monographic methods – for in-depth study of the tasks set; abstract-logical methods – for theoretical generalization of the research results and formulation of conclusions and proposals. The research results are of practical importance for domestic and foreign business analysts, entrepreneurs. The results obtained reproduce the priority postulates for the formation of a set of measures in the direction of studying the aspects of developing an effective concept for implementing BIM-technologies in the management of development projects. The originality of the scientific research lies in substantiating the spectrum of modern business solutions in the field of development project management, systematizing management processes, which determines the reproduction of strategic guidelines for the revitalization of Ukrainian economy.

Keywords: *BIM-technologies; building information modeling; forecasting; digitalization; business solutions; development project; management*

Постановка проблеми та її актуальність. В глобальних умовах цифрової трансформації бізнесу, що активно розвивається у всіх сферах, включаючи будівництво, необхідним є запровадження інноваційного інструментарію кардинального реінжинірингу бізнес-процесів управління проектами. Це, у свою чергу, можливе завдяки впровадженню спеціалізованих цифрових рішень, які дозволяють оптимізувати бізнес-процеси, підвищити ефективність та знизити рівень витрат при реалізації проектів.

У будівельній галузі одним із ключових аспектів цифрової трансформації є впровадження технологій інформаційного моделювання будівель. Ці технології відкривають нові можливості для управління девелоперськими проектами, дозволяючи здійснювати моніторинг прогресу, координувати стейкхолдерів та зменшувати ступінь впливу ризиків, що пов'язані із помилками у розрахунках та проектуванні. Крім того, впровадження BIM-технологій позитивно впливає на екологічні аспекти будівництва. Завдяки точному розрахунку матеріалів та ресурсів можна суттєво знизити відходи.

Таким чином, цифрова трансформація у будівництві є невід'ємною частиною

розвитку даного сектору національної економіки. Вона не лише підвищує ефективність, але й сприяє зростанню конкурентоспроможності компаній. Успішне впровадження нових технологій дозволяє не лише оптимізувати внутрішні процеси, а й покращити якість кінцевого продукту, що є особливо актуальним на етапі післявоєнної відбудови держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням проблематики впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проектами опікувалось багато як вітчизняних, так і закордонних науковців.

Наприклад, М. Кулік, С. Куліш, С. Іщенко [1], С. Гузенко [5], Р. Аксельрод, А. Шпаков, Г. Рижаківа [9] проаналізували впровадження новітніх цифровізованих програмних комплексів на базі BIM-технологій у будівництві України, що обумовлено актуальністю даного питання в умовах ревіталізації економіки України, розкрили організаційно-економічну характеристику економіко-управлінських предикторів трансформації операційних систем будівельного девелопменту в умовах цифровізації економіки.

Д. Чашин, О. Рахманін, Д. Хіль [4] аналізують впровадження BIM-технологій,

як основи для створення комплексних інформаційних моделей в керуванні будівництвом.

Н. Левченко, П. Бейнер, Н. Бейнер [6] проаналізували проблематику реалізації реконструкції будівель з використанням BIM-технологій при відновленні міст в Україні, що є особливо актуальним в контексті повномасштабного воєнного вторгнення на територію держави.

О. Мостовенко, О. Геращенко, Я. Федорова, М. Черненко, Г. Рижаківа [7] розкривають сутність провідних економіко-управлінських та інституційних імперативів галузевого розвитку будівництва в контексті євроінтеграції, що обумовлено євроінтеграційним вектором економіки України.

Д. Приходько, А. Шпаков, О. Геращенко, Н. Кішак, Х. Чуприна, В. Роговченко, М. Горбач провели комплексну оцінку структурної конфігурації корпоративних відносин у контексті організаційного розвитку проєктно-орієнтованих підприємств [10].

Закордонні науковці також активно досліджують проблематику впровадження BIM-технологій, зокрема: Chen C., Jin X.-H., Luo Z.-Y., Ke Z.-H. [2], Wirtz M., Böhm C., Frank R. [3] та багато інших.

Однак, проблематика дослідження аспектів розробки ефективної концепції впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проєктами залишається не розкритою у повній мірі та потребує подальшого доопрацювання.

Мета статті. Мета статті полягає у дослідженні аспектів розробки ефективної концепції впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проєктами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Будівельне інформаційне моделювання (BIM-технології) – є терміном, що використовується для надання всеохоплюючої характеристики комплексу спеціального інструментарію забезпечення інтегрованої бази даних багатопрфільної інформації щодо ефективності проєктування, реалізації та експлуатації будівельного комплексу. Відповідний підхід сприяє

покращенню рівня співпраці між усіма стейкхолдерами, забезпечуючи зменшення витрат часу на підготовку необхідної документації.

В сучасних надскладних умовах ведення бізнесу, під негативним впливом факторів повномасштабного воєнного вторгнення, – однією з основних переваг BIM-технологій стає можливість забезпечення візуалізації девелоперського проєкту на різних етапах його реалізації. За допомогою побудови тривимірних моделей та проведення спектру відповідних розрахунків архітектори, інженери та підрядники можуть детально аналізувати конструктивні рішення, виявляти потенційні проблеми ще до початку будівництва та уникати помилок, які можуть призвести до затримок і додаткових витрат на різних етапах реалізації девелоперського проєкту. Означена парадигма є основоположною у спектрі сучасних бізнес-рішень в сфері управління девелоперськими проєктами та дозволяє автоматизувати багато управлінських процесів, що зменшує ймовірність помилок, що можуть бути допущені за рахунок людського фактору. Тривимірна модель будівлі міцно пов'язується з інформаційною базою даних, через це зміна принаймні одного параметра будівельного об'єкта спричинює трансформації систем і об'єктів, що пов'язані з ним, включно з кресленням, специфікацією, візуалізацією, календарним графіком [1, с. 301–304]. BIM-технології є інноваційним інструментарієм рішень у сфері менеджменту девелоперських проєктів. Сучасні рішення у сфері BIM-технологій забезпечують комплексність усієї системи менеджменту, адже зміни чи доповнення в одному з елементів моделі управлінських процесів автоматично оновлюють всю пов'язану документацію, що забезпечує узгодженість даних і знижує ризик виникнення конфліктів під час виконання робіт на будь-якому з етапів реалізації девелоперського проєкту.

Додатковим позитивним аспектом, в контексті реалізації концепції впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проєктами, є забезпечення

використання механізмів зниження рівня загальних витрат на реалізацію проєкту, що стає можливим завдяки інтеграції різних спеціалізацій у рамках одного девелоперського проєкту. Наприклад, інженери, механіки та електрики можуть працювати з однією моделлю, що дозволяє їм краще координувати свої дії та уникати дублювання роботи. Це, в свою чергу, призводить до підвищення ефективності та знижує загальні витрати на реалізацію девелоперського проєкту.

Отже, у загальному розумінні, BIM-технології спрямовані на вдосконалення

кожного етапу девелоперського проєкту, - від ідеї про його реалізацію до експлуатації готового проєкту. Кожна зі стадій життєвого циклу девелоперського проєкту безпосередньо пов'язана із використанням BIM-технологій. Проблематика реалізації проєктів, що пов'язані із сектором девелопменту є стратегічним пріоритетом на державному рівні та потребує сучасних технологічних рішень. Проте, необхідним є акцентування уваги на виокремленні базових відмінностей між BIM-технологіями та стандартними технологіями 3D CAD (рис. 1).

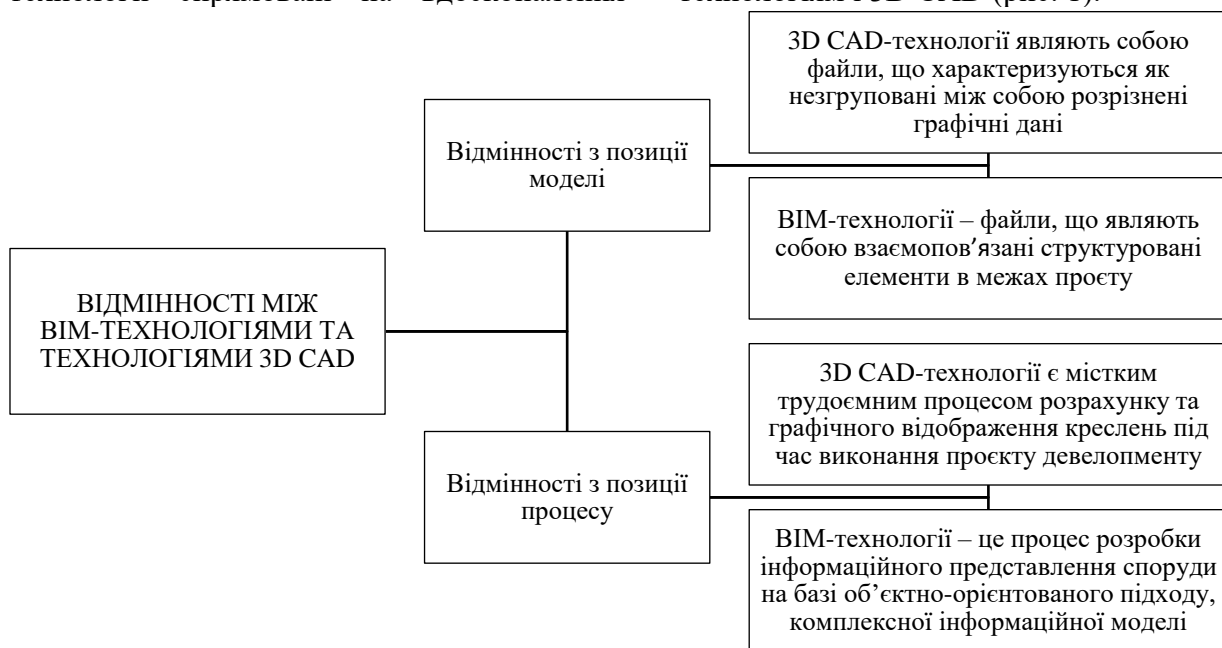


Рис. 1. Відмінності між BIM-технологіями та стандартними технологіями 3D CAD при управлінні девелоперськими проєктами. Джерело : узагальнено автором на підставі аналізу [3–7]

Відтак, в умовах сьогодення впровадження технологій інформаційного моделювання будівель є одним із ключових кроків у процесі цифровізації будівельного сектору національної економіки в цілому. Цей підхід не лише модернізує традиційні методи проєктування, але й забезпечує інтеграцію всіх етапів життєвого циклу будівлі – від концептуального проєктування до обслуговування готового об'єкту, що введено у експлуатацію.

Закордонний досвід демонструє численні приклади ефективного використання BIM-технологій у сучасній практиці проєктування, що забезпечує прискорення термінів реалізації проєктів

сфери девелопменту. Наприклад, у Норвегії, де BIM-технології стали стандартом у будівництві, було зафіксовано зменшення термінів реалізації проєктів на 25-30 % [4]. Відповідний позитивний ефект було досягнуто завдяки покращенню координації між усіма учасниками проєкту, що дозволило оптимізувати їх роботу та своєчасно виявити помилки на різних стадіях життєвого циклу девелоперського проєкту, що, в свою чергу, призвело до зменшення ймовірності виникнення додаткових витрат. При цьому, завдяки візуалізації даних крізь призму використання BIM-технологій, усі учасники девелоперського проєкту мають потенційну можливість комунікування один з одним, що

суттєво спрощує ухвалення спектру управлінських рішень.

У підсумку, BIM-технології не лише сприяють прискоренню процесу будівництва, але також забезпечують високу якість кінцевого продукту. Це особливо важливо в умовах зростаючої конкуренції на ринку будівельних послуг в умовах ревіталізації економіки України.

В цілому, для досягнення максимального рівня позитивного ефекту від впровадження BIM-технологій, - необхідним є розуміння комплексності їх характеру. Тобто, впровадження BIM-технологій виключно на

рівні одного окремого проєкту сфери девелопменту не матиме позитивного ефекту для будівельної компанії. Відтак, ефективне використання BIM-технологій на платформі компаній є можливим тільки завдяки розробці всеохоплюючої концепції їх впровадження, що ґрунтується на реалізації спектру довгострокових стратегічних цілей суб'єкту ведення бізнесу.

На рисунку 2 відображено основоположні постулати розробки ефективної концепції впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проєктами



Рис. 2. Основоположні складові розробки ефективної концепції впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проєктами. Джерело : розробка автора

Проаналізуємо детальніше кожен з означених складових розробки ефективної концепції впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проєктами. Масштабність передбачає собою формування імпульсу для структурної перебудови компанії, оскільки впровадження BIM-технологій відбувається на кожному з етапів життєвого циклу проєкту сфери девелопменту. Стратегічне орієнтування є підґрунтям для відтворення довгострокових стратегічних цілей компанії, що потребує інформування усіх груп співробітників щодо впровадження BIM-технологій на платформі компанії та необхідності сприйняття інноваційних інструментів проєктування. Дана складова розробки ефективної концепції впровадження BIM-технологій в управлінні девелоперськими проєктами зорієнтована на розуміння співробітниками компанії необхідності та важливості запроваджених інноваційних змін, їх ролі у трансформаційних перетвореннях в системі менеджменту в цілому. Поділ на етапи

передбачає наявність звітування на кожному із відповідних розподілених кроків щодо реалізації BIM-технологій на платформі організації. Відповідна складова ґрунтується на проведенні оцінки результатів досягнення сформованих цілей співробітниками компанії на кожному з означених етапів впровадження BIM-технологій. Означений аналіз проміжних результатів дозволяє сформулювати прогнозування ефективності впровадження BIM-технологій на платформі компанії.

17 лютого 2021 р. Кабінетом Міністрів України була затверджена Концепція впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні, а також дії щодо її впровадження [8]. Означену концепцію заплановано реалізовувати у період до 2035 року, що, на сьогоднішній день, передбачає реалізацію двох основних фаз, а саме:

– Фаза I (2025-2030 рр.): передбачає розширення спектру критеріїв обов'язковості використання BIM-

технологій в проєктах сфери девелопменту, що реалізуються за рахунок коштів державного бюджету.

– Фаза II (2031-2035 рр.): характеризується комплексним обов'язковим застосуванням BIM-технологій в проєктах сфери девелопменту та передбачає розширення спектру критеріїв обов'язковості використання BIM-технологій в проєктах, що реалізуються за рахунок приватних коштів.

Впровадження технології інформаційного моделювання будівель є складним і багатовимірним процесом, що вимагає суттєвих зусиль від менеджменту тих компаній, які прагнуть адаптувати свої внутрішні процеси під інноваційні вимоги сучасності. Перш за все, компаніям необхідно провести всебічний аналіз існуючих методів роботи та визначити, які з них потребують оновлення. Це може включати запровадження змін в проєктуванні, менеджменту проєктів, а також у способах комунікації між стейкхолдерами на усіх етапах реалізації девелоперського проєкту.

Враховуючи важливість та всеосяжний характер трансформаційних перетворень, BIM-технології є одним із головних аспектів цифрових зрушень, що обумовлюють необхідність забезпечення навчання персоналу будівельних компаній з метою їх впровадження та ефективного використання. Співробітники повинні не лише ознайомитися з новими програмними продуктами в контексті впровадження BIM-технологій, а й освоїти нові підходи до роботи. Це може включати проведення тренінгів, семінарів, а також можливість

отримання сертифікацій. Наступним важливим компонентом успішного впровадження BIM-технологій є запровадження у використання потужного програмного забезпечення для моделювання, що передбачає залучення додаткового інвестиційного капіталу.

Висновки

BIM-технології дозволяють суттєво підвищити якість проєктування, адже візуалізація девелоперського проєкту ще до початку будівництва допомагає виявити потенційні проблеми та забезпечити їх вирішення ще до початку стадії реалізації безпосереднього проєкту. Це зменшує ймовірність помилок, що, в свою чергу, - призводить до економії часу та фінансових ресурсів. Крім того, зростає швидкість реалізації девелоперського проєкту, оскільки всі учасники мають доступ до однієї бази даних, що дозволяє уникнути проблем у комунікації.

Перспективами подальших наукових досліджень, в рамках означеної проблематики, є висвітлення аспектів забезпечення інтеграції BIM-технологій з іншими цифровими інструментами, наприклад, - Інтернет речей та штучний інтелект, що відкриває нові можливості для оптимізації бізнес-процесів в контексті управління девелоперськими проєктами. Наприклад, Інтернет речей може забезпечити реальний моніторинг стану будівельних матеріалів, а штучний інтелект може аналізувати інформаційні дані для прогнозування ступеню впливу потенційних ризиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кулік М. В., Куліш С. О., Іщенко С. С. Впровадження новітніх цифровізованих програмних комплексів на базі BIM-технологій у будівництві України. *Науковий вісник будівництва. Серія : Будівництво*. 2020. № 2. С. 301–306.
2. Chen C., Jin X.-H., Luo Z.-Y. & Ke Z.-H. Building a Digital Transformation Maturity Evaluation Model for Construction Enterprises. *Buildings*. 2022. № 14 (1). Pp. 91–119.
3. Wirtz M., Böhm C. & Frank R. Vision and Maturity Model for Digitized Project Management. *Project Management and Engineering Research*. 2023. Pp. 63–73. Springer.
4. Чашин Д. Ю., Рахманін О. А., Хіль Д. В. Упровадження BIM-технологій як основи для створення комплексних інформаційних моделей в керуванні будівництвом. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 1. С. 63–70. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.63.834>

5. Гузенко С. Як BIM змінить девелопмент та Real Estate в Україні. ЛІГА.net. 29.11.2022. URL: <https://blog.liga.net/user/sguzenko/article/yakbimzminit-development-ta-real-estate-v-ukraini> (дата звернення: 08.05.2025 р.).
6. Левченко Н. М., Бейнер П. С., Бейнер Н. В. Реконструкція будівель з використанням BIM-технологій при відновленні міст в Україні. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 4. С. 64–70.
7. Мостовенко О., Геращенко О., Федорова Я., Черненко М., Рижакова Г. Провідні економіко-управлінські та інституційні імперативи галузевого розвитку будівництва в контексті євроінтеграції. *Просторовий розвиток*. 2024. № 7. С. 577–593.
8. Концепція впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 р. № 152-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-p#Text> (дата звернення: 08.05.2025 р.).
9. Аксельрод Р. Б., Шпаков А. В., Рижакова Г. М. Економіко-управлінські предиктори трансформації операційних систем будівельного девелопменту в умовах цифровізації економіки. *Формування ринкових відносин в Україні*. 2021. № 12. С. 113–121.
10. Приходько Д., Шпаков А., Геращенко О., Кішчак Н., Чуприна Х., Роговченко В., Горбач М. Оцінка структурної конфігурації корпоративних відносин у контексті організаційного розвитку проектно-орієнтованих підприємств. *Управління розвитком складних систем*. 2022. № 52. С. 93–102.

REFERENCES

1. Kulik M.V., Kulish S.O. and Ishchenko S.S. *Vprovadzhennia novitnikh tsyfrovizovanykh prohramnykh kompleksiv na bazi VIM-tekhnologii u budivnytvi Ukrainy* [Introduction of the Latest Digital Software Package Based on BIM-Technologies in the Construction of Ukraine]. *Naukovyi visnyk budivnytstva. Serii : Budivnytstvo* [Scientific Bulletin of Construction. Series : Civil Engineering]. 2020, no. 2, pp. 301–306. DOI: 10.29295/2311-7257-2020-100-2-301-306. (in Ukrainian).
2. Chen C., Jin X.-H., Luo Z.-Y. and Ke Z.-H. Building a Digital Transformation Maturity Evaluation Model for Construction Enterprises. *Buildings*. 2020, no. 14 (1), pp. 91–119.
3. Wirtz M., Böhm C. and Frank R. Vision and Maturity Model for Digitized Project Management. *Project Management and Engineering Research*. 2023, pp. 63–73. Springer.
4. Chashyn D.Yu., Rakhmanin O.A. and Khil D.V. *Uprovadzhennia BIM-tekhnologii yak osnovy dlia stvorennia kompleksnykh informatsiinykh modelei v keruvanni budivnytstvom* [Introduction of BIM- Technologies as a Basis for Creation of Complex Information Models in Construction Management]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, no. 1, pp. 63–70. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.63.834> (in Ukrainian).
5. Huzenko S. *Yak BIM zminyt development ta Real Estate v Ukraini* [How BIM Will Change Development and Real Estate in Ukraine]. LIGA.net. November 29, 2022. URL: <https://blog.liga.net/user/sguzenko/article/yak-bim-zminit-development-ta-real-estate-vukraini>
6. Levchenko N.M., Beiner P.S. and Beiner N.V. *Rekonstruksii budivel z vykorystanniam BIM tekhnologii pry vidnovlenni mist v Ukraini* [Reconstruction of Buildings Using BIM Technologies During City Renewal in Ukraine]. *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2022, no. 4, pp. 64–70. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.271222.64.912> (in Ukrainian).
7. Mostovenko O., Herashchenko O., Fedorova Ya., Chernenko M. and Ryzhakova H. *Providni ekonomiko-upravlinski ta instytutsiini imperatyvy haluzevoho rozvytku budivnytstva v konteksti yevrointehratsii* [Leading economic, managerial and institutional imperatives of the construction sector development in the context of European integration]. *Prostorovi rozvytok* [Spatial Development]. 2024, no. 7, pp. 577–593. (in Ukrainian).
8. *Kontsepsiya vprovadzhennya tekhnologiy budivel'noho informatsiynoho modelyuvannya (VIM-tekhnologiy) v Ukrayini : skhvaleno rozporядzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 17.02.2021 r. № 152-r.* [Concept for the implementation of building information modeling technologies (BIM technologies) in Ukraine : approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated February 17, 2021, No. 152-r.]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1522021-p#Text> (in Ukrainian).
9. Akselrod R.B., Shpakov A.V. and Ryzhakova H.M. *Ekonomiko-upravlinski predyktory transformatsii operatsiinykh system budivel'noho development v umovakh tsyfrovizatsii ekonomiky* [Economic and managerial predictors of the transformation of construction development operating systems in the context of digitalization of the economy]. *Formuvannia rynkovykh vidnosyn v Ukraini* [Formation of Market Relations in Ukraine]. 2021, no. 12, pp. 113–121. (in Ukrainian).
10. Prykhodko D., Shpakov A., Herashchenko O., Kishchak N., Chupryna Kh., Rohovchenko V. and Horbach M. *Otsinka strukturnoi konfigurationsii korporatyvnykh vidnosyn u konteksti orhanizatsiynoho rozvytku proiektno-orientovanykh pidpriemstv* [Assessment of the structural configuration of corporate relations in the context of organizational development of project-oriented enterprises]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system* [Management of the Development of Complex Systems]. 2022, no. 52, pp. 93–102. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.01.2026.

УДК 711.4:7.012:659.2

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.117.1232

СТАНОВЛЕННЯ І РОЗВИТОК ВІЗУАЛЬНИХ КОМУНІКАЦІЙ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

ХАРЧЕНКО К. С.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
ПОЛЮШКІН С. С.², канд. техн. наук, доц.,
ЯНКОВСЬКА Л. Є.³, канд. техн. наук,
КРАСНЮК А. В.⁴, канд. техн. наук, доц.,
ЩЕДРОВА Т. Г.⁵, ас.

^{1*} Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, 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) 756-93-37, e-mail: katerinaharchenko75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1908-4852

² Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, 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) 756-93-37, e-mail: poliushkin.serhii@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-4740-7652

³ Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, 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) 756-93-37, e-mail: yankovska.larysa@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0358-0998

⁴ Декан факультету промислового та цивільного будівництва, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 606-03-99, e-mail: deanpcb@pcb.diit.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1400-9992

⁵ Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, 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) 756-93-37, e-mail: t.g.shchedrova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0009-0009-8272-2448

Анотація. Постановка проблеми. Інтенсивні процеси урбанізації, зростання масштабів міст і ускладнення їх просторово-функціональної структури зумовлюють підвищення ролі візуальних комунікацій у формуванні міського середовища. Сучасне місто характеризується високою інформаційною насиченістю, що проявляється у значній кількості візуальних повідомлень, знаків, рекламних і навігаційних елементів. Відсутність цілісного, науково обгрунтованого підходу до проектування систем візуальної комунікації призводить до інформаційного перевантаження, порушення орієнтації в просторі, виникнення візуального шуму та зниження естетичної якості міського середовища. У зв'язку з цим актуалізується необхідність комплексного наукового осмислення візуальних комунікацій як важливої складової дизайну міста та соціокультурного феномена, що впливає на сприйняття, поведінку та емоційний стан людини в міському просторі. **Мета дослідження** полягає у виявленні особливостей становлення та розвитку зовнішніх візуальних комунікацій у міському середовищі, визначенні їх функціональної та естетичної ролі у формуванні образу міста, забезпеченні орієнтації й інформаційної доступності міського простору, а також у розкритті специфіки візуальної мови графічного дизайну як комунікативної системи. **Результати та висновки.** У ході дослідження обгрунтовано, що візуальні комунікації є невід'ємним елементом міського середовища та відіграють важливу роль у його просторовій організації. Встановлено, що вони виконують навігаційну, інформаційну, регулятивну та естетичну функції, забезпечуючи зручність орієнтації, упорядкування інформаційних потоків і формування цілісного візуального образу міста. Визначено, що візуальна мова графічного дизайну базується на системі знаків і візуальних повідомлень, значення яких є контекстуальним та залежить від просторових, функціональних і соціокультурних особливостей міського середовища. Доведено, що ефективно спроектовані системи візуальної комунікації сприяють підвищенню комфорту міського простору, зниженню рівня візуального перевантаження, формуванню позитивного емоційного середовища та зміцненню цілісної міської ідентичності.

Ключові слова: міське середовище; дизайн міста; візуальні комунікації; графічний дизайн; візуальна мова; знак; міський простір

FORMATION AND DEVELOPMENT OF VISUAL COMMUNICATIONS OF THE URBAN ENVIRONMENT

KHARCHENKO K.S.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
POLIUSHKIN S.S.², Cand. Sc., Assoc. Prof.,

YANKOVSKA L.Ye.³, *Cand. Sc. (Tech.)*,
KRASNYUK A.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SHCHEDROVA T.G.⁵, *Ass.*

^{1*} Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, 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) 756-93-37, e-mail: katerinaharchenko75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1908-4852

² Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, 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) 756-93-37, e-mail: poliushkin.serhii@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-4740-7652

³ Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, 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) 756-93-37, e-mail: yankovska.larysa@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0358-0998

⁴ Dean of the Faculty industrial and civil construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (067) 606-03-99, e-mail: deanpcb@pcb.diit.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1400-9992

⁵ Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, 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) 756-93-37, e-mail: t.g.shchedrova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0009-0009-8272-2448

Abstract. Problem statement. Intensive urbanization processes, the growth of the scale of cities and the complication of their spatial and functional structure lead to an increase in the role of visual communications in the formation of the urban environment. The modern city is characterized by high information saturation, which is manifested in a significant number of visual messages, signs, advertising and navigation elements. The lack of a holistic, scientifically based approach to the design of visual communication systems leads to information overload, impaired orientation in space, the emergence of visual noise and a decrease in the aesthetic quality of the urban environment. In this regard, the need for a comprehensive scientific understanding of visual communications as an important component of city design and a socio-cultural phenomenon that affects the perception, behavior and emotional state of a person in urban space is becoming more urgent. **The purpose of the study** is to identify the features of the formation and development of external visual communications in the urban environment, determine their functional and aesthetic role in shaping the image of the city, ensuring orientation and information accessibility of urban space, as well as to reveal the specifics of the visual language of graphic design as a communicative system. **Results and conclusions.** The study substantiated that visual communications are an integral element of the urban environment and play an important role in its spatial organization. It was established that they perform navigational, informational, regulatory and aesthetic functions, ensuring ease of orientation, streamlining information flows and forming a holistic visual image of the city. It was determined that the visual language of graphic design is based on a system of signs and visual messages, the meaning of which is contextual and depends on the spatial, functional and socio-cultural features of the urban environment. It was proven that effectively designed visual communication systems contribute to increasing the comfort of urban space, reducing the level of visual overload, forming a positive emotional environment and strengthening a holistic urban identity.

Keywords: *urban environment; city design; visual communications; graphic design; visual language; sign; urban space*

Вступ. Сучасне місто є складною багаторівневою системою, у якій поєднуються просторові, соціальні, культурні та інформаційні процеси. Зростання масштабів урбанізації та інтенсивність комунікативних потоків призводять до ускладнення структури міського середовища та підвищення вимог до його організації [2]. У цих умовах дизайн міського середовища постає як синтетична галузь, що інтегрує містобудування, архітектуру, ландшафтний дизайн і графічні засоби в єдину просторово-комунікативну систему [4].

Візуальні комунікації є одним із ключових інструментів взаємодії людини з міським середовищем. Вони забезпечують

передачу інформації, орієнтацію в просторі, регулювання поведінки та формування емоційного сприйняття міста [1]. Саме тому дослідження становлення та розвитку візуальних комунікацій у міському середовищі є актуальним завданням сучасної архітектурно-дизайнерської науки.

Історія розвитку візуальних комунікацій міського середовища. Історичний розвиток візуальних комунікацій нерозривно пов'язаний з еволюцією міста як соціокультурного феномена. Уже в давніх цивілізаціях Месопотамії, Єгипту, Античної Греції та Риму візуальні знаки виконували інформаційно-символічну та регулятивну функції. Написи на кам'яних стелах, рельєфи,

фрески, монументальна архітектура використовувалися для фіксації правових норм, релігійних уявлень і політичної влади [5].

У середньовічний період, в умовах низького рівня писемної культури, домінували образно-символічні засоби комунікації. Геральдичні знаки, цехові емблеми, символічні вивіски виконували функцію ідентифікації місць і соціальних груп. Візуальні комунікації в цей період формували універсальну мову міського простору, зрозумілу незалежно від вербальних знань [3].

Епоха Відродження та Нового часу сприяла раціоналізації міського середовища. З розвитком науки та мистецтва візуальні комунікації набувають системності, поєднуючи естетичну та інформаційну складові. Архітектурні ансамблі, міські площі, монументально-декоративні елементи формували впорядкований образ міста як цілісної комунікативної структури [5].

Промислова революція XIX століття стала переломним етапом у розвитку міських візуальних комунікацій. Масове виробництво, розвиток транспорту та зростання міст зумовили потребу у швидкій та зрозумілій передачі інформації. Саме в цей період активно розвиваються зовнішня реклама, стандартизовані вивіски, афіші та навігаційні елементи, що водночас спричиняє явище візуального перевантаження [1].

Світовий досвід розвитку візуальних комунікацій міського середовища свідчить про перехід від стихійного використання графічних елементів до системного, науково обґрунтованого проектування. У провідних містах світу візуальні комунікації розглядаються як стратегічний ресурс розвитку міста, що забезпечує орієнтацію, безпеку, естетичну якість та формування цілісної міської ідентичності. Узагальнення цього досвіду є важливим підґрунтям для подальшого розвитку вітчизняної практики дизайну міського середовища [12–17].

Світовий досвід дослідження візуальних комунікацій міського середовища представлений міждисциплінарним колом персоналій – від урбаністів і дизайнерів до

філософів і психологів. Їхні наукові напрацювання сформували сучасне розуміння міста як візуально-комунікативної системи та стали теоретичною і практичною основою для проектування ефективного, гуманного й інформаційно впорядкованого міського середовища.

Однією з фундаментальних постатей є Кевін Лінч, американський урбаніст і теоретик міста. У праці «*The Image of the City*» (1960) він уперше системно дослідив візуальне сприйняття міського простору та ввів поняття образу міста, сформованого через такі елементи, як шляхи, межі, райони, вузли та орієнтири. Його концепція стала теоретичною основою для розвитку міських навігаційних систем і візуальних комунікацій у публічному просторі [5].

Вагомий внесок у розвиток візуальної мови міста зробив Ян Гел — данський архітектор і урбаніст. У своїх дослідженнях він акцентував увагу на людині як головному користувачі міського простору, підкреслюючи значення візуальних і просторових сигналів для формування комфортного та гуманного міста. Його роботи сприяли інтеграції візуальних комунікацій у пішохідні зони та громадські простори [6].

У сфері графічного дизайну та міської навігації ключову роль відіграв Йозеф Мюллер-Брокманн, представник швейцарської школи дизайну. Він розробив принципи модульної сітки, інформаційної ієрархії та типографічної ясності, які стали основою для створення систем візуальної навігації у транспортних і міських просторах по всьому світу [7].

Значний вплив на розуміння знакової природи візуальних комунікацій мав Умберто Еко, італійський філософ і семіотик. У своїх працях він розглядав місто як текст і знакову систему, де архітектура та візуальні повідомлення функціонують як носії культурних смислів. Його підхід став важливим для теоретичного осмислення візуальних комунікацій у міському середовищі [8].

У дослідженні психологічних аспектів візуального сприйняття міського середовища

вагоме місце посідають роботи Гордона Бауера, Патрісії Вальдес та Альберта Меграбяна. Вони вивчали вплив настрою, кольору та візуальних характеристик середовища на емоційний стан і поведінку людини, що стало теоретичним підґрунтям для використання кольорового кодування та емоційно орієнтованого дизайну в міських просторах [9; 10].

У галузі комерційних та публічних просторів важливим є внесок **Алана Кроулі**, який досліджував вплив кольору та візуальних параметрів середовища на поведінкові реакції людини. Його роботи підтверджують значення візуальних комунікацій як інструменту управління увагою та поведінкою у міському просторі [11].

Наповнення міського середовища різноманітними елементами формує так званий **«містобудівний партер»** – «нижній» шар візуального сприйняття міста. До нього входять вуличні меблі та обладнання (лави, освітлення, урни тощо), вивіски і зовнішня реклама, інформаційні таблички, оформлення вітрин, графічне оздоблення фасадів та дорожніх покриттів (так звана *суперграфіка*), міська скульптура, панно та інші об'єкти монументально-декоративного мистецтва. Усі ці елементи стали невід'ємною частиною міського простору, визначаючи його зручність, естетичні якості та загальне враження від міста. Саме через них формується візуальний образ окремих місць і міста в цілому, його *«душа»* та ідентичність. Місто виступає не лише як архітектурний феномен чи результат будівельного і дизайнерського мистецтва, але й як складне соціокультурне утворення, у якому відбуваються різноманітні форми людської діяльності [5]. Таким чином, поняття міського середовища охоплює як фізичну структуру, так і культурно-комунікативний простір міста.

Роль візуальних комунікацій у дизайні міста. Одним з найважливіших елементів дизайну міського середовища є **візуальна комунікація** – система візуально-графічних знаків та рішень, спрямованих на забезпечення орієнтації в просторі,

регулювання поведінки людей у конкретних ситуаціях, створення комфортного освітлення та позитивного емоційного настрою [4; 5]. Візуальні комунікації інтегрують знання промислового, графічного дизайну та дизайну середовища, формуючи комплексний підхід до організації міського простору. До засобів міської візуальної комунікації належить широкий спектр елементів: зовнішня реклама, інформаційні табло і покажчики, дорожні знаки та піктограми, графічне оформлення будівель і вулиць (*суперграфіка*), шрифтові композиції у міському просторі, колірне кодування об'єктів та інші візуальні знаки. Проектування систем візуальної комунікації відбувається на перетині кількох дизайнерських напрямів і потребує врахування як функціональних, так і естетичних вимог [3].

Розвинена система візуальних комунікацій виконує низку важливих функцій у місті. Зокрема, можна виокремити такі основні завдання:

- **Покращення орієнтації у просторі** – візуальні знаки та покажчики допомагають мешканцям і гостям міста легко орієнтуватися в складній міській структурі, що забезпечує психологічний комфорт пересування.

- **Подолання мовних бар'єрів** – використання універсальних піктограм та зрозумілих графічних символів (особливо в транспортних вузлах, туристичних центрах) сприяє комунікації між людьми, які розмовляють різними мовами, і робить міський простір більш інклюзивним.

- **Формування зрозумілої функціонально-просторової структури** – через колірне та графічне маркування, інформаційні таблички та схеми вказується призначення різних зон і об'єктів міста, що полегшує розуміння простору та поведінкові сценарії в ньому.

Окрім утилітарних функцій, візуальні комунікації створюють естетичний образ міста та впливають на емоційний стан його мешканців. Добре продумане міське середовище з привабливою графічною навігацією, ознакуванням та освітленням

формує позитивний емоційний фон і підвищує загальний комфорт перебування у місті. Дослідження підтверджують, що візуальні фактори середовища, такі як колір та освітлення, можуть істотно впливати на настрої, пам'ять та поведінку людей [9; 10]. Зокрема, колірне оформлення здатне підсилювати або послаблювати емоційні реакції та навіть впливати на споживчу активність у торговельних просторах [9]. Таким чином, візуальні комунікації у місті виконують не лише інформаційно-навігаційну, але й психоемоційну та культурно-естетичну роль, підсилюючи привабливість і зручність міського середовища.

Варто відзначити, що розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для візуальних комунікацій в урбаністичному контексті. Сучасні міста впроваджують електронні інформаційні табло, інтерактивні навігаційні системи, медіафасади та інші цифрові рішення, що збагачують візуальний ландшафт. Це розширює арсенал дизайнера міського середовища, дозволяючи динамічно змінювати інформацію та адаптувати її під поточні потреби. Проте базові принципи ефективної комунікації – зрозумілість, помірність, доречність – залишаються незмінними і потребують науково обґрунтованого підходу при проєктуванні [1; 4].

Типи візуальних повідомлень та знаків. Візуальна комунікація оперує системою знаків і повідомлень, які сприймаються зором. **Візуальний знак** можна визначити як елементарну одиницю мовної системи, що поєднує зміст (значення) та форму (графічне вираження) [5]. Прикладами знаків у міському дизайні є піктограми, символи, логотипи, стрілки, кольорові позначки – усе те, що несе певну інформацію у візуальній формі. **Візуальне повідомлення** – це інформація, передана від відправника до одержувача за допомогою візуальних знаків; у контексті дизайну міського середовища таким повідомленням може бути, наприклад, дорожній знак, афіша чи інфографіка.

Візуальна мова графічного дизайну має складну структуру, що складається з багатьох взаємодіючих елементів. На відміну від вербальної (словесної) мови, де існують чіткі дискретні одиниці (букви, слова) та фіксований словник, у візуальному дизайні важко виділити мінімальні незмінні «елементи абетки» із наперед заданим значенням [4]. Значення кожного графічного елемента – точки, лінії, форми, кольору, фактури – завжди визначається контекстом і конкретним завданням, в якому цей елемент використовується [4]. Так, одна й та сама колірна пляма або символ можуть мати різну інтерпретацію залежно від ситуації (наприклад, червоний колір може сигналізувати небезпеку на знаку, але означати святковість в декорі). Багато дослідників мистецтва і дизайну намагалися створити універсальну «візуальну мову» або систему читання зображень (серед них В. Кандинський, Л. Прието, Б. Кокюла, К. Пейруте та ін.), однак у практичному дизайні значення візуальних повідомлень залишаються багатозначними і залежать від контексту застосування.

У межах теорії комунікації важливо розрізнити кілька фундаментальних понять. **Комунікація** – це процес передачі повідомлення від одного суб'єкта до іншого за допомогою певних знаків або сигналів; важливою умовою ефективної комунікації є наявність зворотного зв'язку від отримувача. **Спілкування** (інтерація) – це міжсуб'єктна взаємодія, спрямована на спільне вироблення змісту та розуміння; на відміну від односпрямованої комунікації, спілкування є двостороннім процесом обміну інформацією та змістами [4]. **Мова** – це система знаків, що використовується для комунікації; вона може бути вербальною (мова людського спілкування) або невербальною (візуальна, жести тощо). У цьому сенсі візуальна мова постає як комунікативна система, де знаки графічного дизайну виконують роль носіїв сенсів.

Для графічного дизайну характерний багатовекторний процес передачі повідомлень: візуальна інформація може одночасно спрямовуватися до широкої

аудиторії і сприйматися різними групами людей у різний спосіб [4]. Ефективний обмін інформацією в візуальній комунікації відбувається за умови достатнього інформаційного контрасту між повідомленням і фоном середовищем. Чим більша новизна або відмінність візуального повідомлення, тим інтенсивнішим є його вплив на реципієнта. Саме тому в практиці графічного дизайну постійно створюються нові образи і візуальні рішення, адже застарілі стереотипи перестають привертати увагу та блокують потік інформації [4]. Візуальна комунікація, зокрема реклама, потребує оновлення образів для підтримання зацікавленості аудиторії [1].

Візуальна мова графічного дизайну, як складова соціальної комунікації, виконує роль інструмента соціального управління: вона формує поведінкові моделі, естетичні смаки та навіть соціальні норми у суспільстві. Отже, система візуальних комунікацій має бути якісно вибудована для досягнення максимальної ефективності впливу [4]. Комунікативні зв'язки в суспільстві здійснюються не лише через безпосередню взаємодію між людьми, але й опосередковано – через передачу інформаційних образів і культурних цінностей від покоління до покоління [5]. У цьому контексті візуальна комунікація є необхідною умовою існування сучасної урбанізованої громади, адже саме через знаки і символи місто «говорить» зі своїми мешканцями та гостями.

Візуальне повідомлення в дизайні можна вважати первинною формою існування візуальної мови. Заданий графічний образ (плакат, піктограма, логотип тощо), створений дизайнером, набуває статусу знака, значення якого виходить за межі буквального змісту і може інтерпретуватися незалежно від свого автора чи конкретного отримувача. По суті, візуальне повідомлення, втілене у певній графічній формі, стає самостійним носієм смислу, що існує у просторі міста. Коли ж низка візуальних повідомлень об'єднується тематично або просторово, вона утворює **візуальний текст**. Наприклад, окремий соціальний плакат є повідомленням, але серія плакатів на виставці

формує цілісний текст, присвячений певній проблематиці (екологічній, культурній тощо). Взаємодіючи між собою, різні візуальні тексти у місті (реклама, інформаційні стенди, мистецькі інсталяції, вивіски) творять розгалужене поле змістів – своєрідний **візуальний гіпертекст** міського середовища. У цьому гіпертексті кожне повідомлення співвідноситься з іншими, формуючи багаторівневу мережу значень і образів, що збагачують сприйняття міста. Слід відзначити, що в сучасну епоху поняття «текст» у культурології розширилося і охоплює всю соціокультурну реальність як сукупність символів, знаків та артефактів. При цьому значну роль відіграють саме тексти, створені на візуальних носіях – друкована продукція, мультимедійні проекти, екранні зображення тощо [3]. Розвиток візуальних комунікацій у міському середовищі вписується в цю загальну тенденцію зростання ролі візуальних текстів у культурі XXI століття.

Висновки

Історичний аналіз розвитку міських візуальних комунікацій показав еволюцію від поодиноких символічних знаків у давніх містах до складних багаторівневих комунікативних систем у сучасному мегаполісі. Світовий досвід свідчить про поступовий перехід від стихійного використання графічних елементів до цілісного, науково обґрунтованого проектування інформаційно-візуального простору міста. У провідних містах візуальні комунікації розглядаються як стратегічний ресурс розвитку, що забезпечує зручну орієнтацію, безпеку та естетичну якість середовища. Водночас актуалізувалося питання візуального шуму: перенасичення рекламою і цифровими носіями інформації вимагає збалансованого системного підходу до регулювання міського візуального простору.

Дослідження підтвердило, що зовнішні візуальні комунікації функціонують як своєрідна **візуальна мова** міського середовища, яка представлена системою різномірних знаків і повідомлень; їх зміст

формується залежно від контексту та сприймається адресатами неоднаково. Візуальні комунікації виконують ключові **функції**: навігаційну (полегшують орієнтацію в просторі), інформаційну (трансляють необхідні відомості), регулятивну (спрямовують поведінку людей у певних ситуаціях) та естетичну (формують привабливий образ міста і комфортне середовище). Вони долають мовні бар'єри завдяки універсальним символам і піктограмам, сприяючи інклюзивності міського простору. Врахування **психологічних аспектів** є необхідним при дизайні візуального середовища: наукові дослідження підтверджують, що візуальні фактори (колір, освітлення, форма тощо) істотно впливають на емоційний стан, пам'ять і поведінку людини. Це знання використано для впровадження колірного кодування, оптимального освітлення та інших прийомів, які підвищують комфорт і безпеку публічних просторів.

Міждисциплінарні напрацювання провідних фахівців – урбаністів, дизайнерів, психологів (зокрема, ідеї К. Лінча щодо образу міста, концепції Я. Гела про людський

вимір міського простору, принципи візуального дизайну Й. Мюллера-Брокманна, семіотичний підхід У. Еко та ін.) – заклали міцне теоретико-методологічне підґрунтя для сучасного розуміння міста як візуально-комунікативної системи. **Сучасні виклики** у сфері міських візуальних комунікацій пов'язані з необхідністю зменшення інформаційного перенавантаження та адаптації до цифрових технологій. Дотримання принципів зрозумілості, помірності та доречності в розміщенні візуальної інформації є запорукою того, що новітні цифрові носії (медіафасади, інтерактивні табло тощо) доповнюватимуть, а не перевантажуватимуть міський простір. Отже, зовнішні візуальні комунікації утвердилися як невід'ємна складова міського середовища, яка не лише забезпечує його функціональність, але й підсилює естетичну цінність та емоційну привабливість міста. Ефективно спроектовані та впорядковані системи візуальної комунікації підвищують якість життя городян, формують впізнаваний образ міста і стають важливим чинником його сталого розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антонович С. А. Декоративно-прикладне мистецтво. Львів : Світ, 2018. 272 с.
2. Барна Н. В. Дизайн середовища : теорія і практика. Київ : НАУ, 2018. 312 с.
3. Прищенко С. В. Візуальна комунікація в культурному просторі міста. Київ : Кондор, 2016. 256 с.
4. Рижова І. С. Теорія дизайну. Харків : ХДАДМ, 2014. 284 с.
5. Lynch K. The Image of the City. Cambridge : MIT Press, 1960. 194 p. URL: <https://mitpress.mit.edu/9780262620017/the-image-of-the-city/>
6. Gehl J. Life Between Buildings : Using Public Space. Washington : Island Press, 2011. 216 p. URL: <https://islandpress.org/books/life-between-buildings>
7. Müller-Brockmann J. Grid Systems in Graphic Design. Zurich : Niggli, 1981. 176 p. URL: <https://www.niggli.ch/en/product/grid-systems-in-graphic-design>
8. Eco U. A Theory of Semiotics. Bloomington : Indiana University Press, 1976. 354 p. URL: <https://iupress.org/9780253203981/a-theory-of-semiotics/>
9. Bower G. Mood and Memory. *American Psychologist*. 1981. Vol. 36 (2). Pp. 129–148. URL: <https://psycnet.apa.org/record/1981-22354-001>
10. Valdez P., Mehrabian A. Effects of Color on Emotions. *Journal of Experimental Psychology*. 1994. Vol. 123 (4). Pp. 394–409. URL: <https://psycnet.apa.org/record/1994-43934-001>
11. Crowley A. The Two-Dimensional Impact of Color on Shopping. *Marketing Letters*. 1993. Vol. 4 (1). Pp. 59–69. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00994188>
12. Cullen G. The Concise Townscape. London : Architectural Press, 1961. 200 p. URL: <https://www.architecturalpress.com/>
13. Norberg-Schulz C. Genius Loci : Towards a Phenomenology of Architecture. New York : Rizzoli, 1980. 213 p. URL: <https://www.rizzoliusa.com/>
14. Venturi R., Scott Brown D., Izenour S. Learning from Las Vegas. Cambridge : MIT Press, 1972. 240 p. URL: <https://mitpress.mit.edu/9780262720069/learning-from-las-vegas/>
15. Hall E. T. The Hidden Dimension. New York : Anchor Books, 1966. 217 p. URL: <https://archive.org/details/hiddendimension00hall>

16. Arnheim R. *Art and Visual Perception*. Berkeley : University of California Press, 1974. 508 p. URL: <https://www.ucpress.edu/book/9780520242265/art-and-visual-perception>
17. Kostof S. *The City Shaped : Urban Patterns and Meanings Through History*. London : Thames & Hudson, 1991. 352 p.
18. UN-Habitat. *Global Public Space Toolkit*. Nairobi : UN-Habitat, 2015, 118 p. URL: <https://unhabitat.org/global-public-space-toolkit>

REFERENCES

1. Antonovych E.A. *Dekoratyvno-prykladne mystetstvo* [Decorative and applied art]. Lviv : Svit Publ., 2018, 272 p. (in Ukrainian).
2. Barna N.V. *Dyzain seredovyscha: teoriia i praktyka* [Environmental Design : Theory and Practice]. Kyiv : National Aviation University, 2018, 312 p. (in Ukrainian).
3. Pryshchenko S.V. *Vizualna komunikatsiia v kulturnomu prostori mista* [Visual communication in the cultural space of the city]. Kyiv : Kondor Publ., 2016, 256 p. (in Ukrainian).
4. Ryzhova I.S. *Teoriia dyzainu* [Design theory]. Kharkiv : Kharkiv State Academy of Design and Arts, 2014, 284 p. (in Ukrainian).
5. Lynch K. *The image of the city*. Cambridge, MA : MIT Press, 1960, 194 p. URL: <https://mitpress.mit.edu/9780262620017/the-image-of-the-city/>
6. Gehl J. *Life between buildings : Using public space*. Washington, DC : Island Press, 2011, 216 p. URL: <https://islandpress.org/books/life-between-buildings>
7. Müller-Brockmann J. *Grid systems in graphic design*. Zurich : Niggli, 1981, 176 p. URL: <https://www.niggli.ch/en/product/grid-systems-in-graphic-design>
8. Eco U. *A theory of semiotics*. Bloomington, IN : Indiana University Press, 1976, 354 p. URL: <https://iupress.org/9780253203981/a-theory-of-semiotics/>
9. Bower G.H. Mood and memory. *American Psychologist*. 1981, vol. 36 (2), pp. 129–148. URL: <https://psycnet.apa.org/record/1981-22354-001>
10. Valdez P. and Mehrabian A. Effects of color on emotions. *Journal of Experimental Psychology*. 1994, vol. 123 (4), pp. 394–409. URL: <https://psycnet.apa.org/record/1994-43934-001>
11. Crowley A.E. The two-dimensional impact of color on shopping. *Marketing Letters*. 1993, vol. 4 (1), pp. 59–69. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00994188>
12. Cullen G. *The concise townscape*. London : Architectural Press, 1961, 200 p. URL: <https://www.architecturalpress.com/>
13. Norberg-Schulz C. *Genius loci : Towards a phenomenology of architecture*. New York : Rizzoli, 1980, 213 p. URL: <https://www.rizzoliusa.com/>
14. Venturi R., Scott Brown D. and Izenour S. *Learning from Las Vegas*. Cambridge, MA : MIT Press, 1972, 240 p. URL: <https://mitpress.mit.edu/9780262720069/learning-from-las-vegas/>
15. Hall E.T. *The hidden dimension*. New York : Anchor Books, 1966, 217 p. URL: <https://archive.org/details/hiddendimension00hall>
16. Arnheim R. *Art and visual perception*. Berkeley, CA : University of California Press, 1974, 508 p. URL: <https://www.ucpress.edu/book/9780520242265/art-and-visual-perception>
17. Kostof S. *The city shaped: Urban patterns and meanings through history*. London : Thames & Hudson, 1991, 352 p.
18. UN-Habitat. *Global public space toolkit*. Nairobi : UN-Habitat, 2015, 118 p. URL: <https://unhabitat.org/global-public-space-toolkit>

Надійшла до редакції: 12.02.2026.

УДК 378.147

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.125.1233

ОСВІТНІ ВТРАТИ У МАТЕМАТИЧНІЙ ПІДГОТОВЦІ СТУДЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

ЧУМАК Л. О., канд. техн. наук, доц.

Кафедра фізики та прикладної математики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: larisa4umak@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

Анотація. *Актуальність роботи.* Математичні навички є фундаментальними для успішного функціонування людей у багатьох життєвих та професійних сферах. Проблема освітніх втрат у математичній підготовці студентів є надзвичайно важливою, оскільки може мати серйозні та тривалі негативні наслідки як для особистого майбутнього, так і для розвитку суспільства в цілому. В умовах глобалізації та цифрової трансформації економіки якість математичної освіти стає ключовим чинником конкурентоспроможності фахівців на ринку праці. *Мета дослідження* – виявлення причин освітніх втрат у математичній підготовці студентів, аналіз їхніх наслідків та пошук ефективних шляхів подолання проблеми в контексті сучасної вищої освіти. *Методика.* Для досягнення поставленої мети використано комплекс методів: аналіз наукової літератури, анкетування студентів та викладачів, статистичне опрацювання результатів, а також порівняльний аналіз освітніх практик. Такий підхід забезпечує багатовимірне бачення проблеми та дозволяє врахувати як теоретичні, так і практичні аспекти. *Практична значимість.* Результати дослідження можуть бути корисними для викладачів, освітніх управлінців та розробників навчальних програм, які прагнуть підвищити ефективність математичної освіти у вищих навчальних закладах. Вони також можуть слугувати підґрунтям для формування освітньої політики, спрямованої на зменшення освітніх втрат та підвищення академічної успішності студентів. *Результати.* Освітні втрати у математичній підготовці студентів мають багатофакторну природу. Їх подолання можливе лише за умови комплексного підходу, що включає реформування навчальних програм, удосконалення методів викладання та створення сприятливого освітнього середовища. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці моделей моніторингу освітніх втрат та оцінці ефективності запропонованих стратегій у різних освітніх контекстах.

Ключові слова: освітні втрати; математична освіта; адаптивне навчання; індивідуалізація; цифрові платформи; дистанційне навчання

EDUCATIONAL LOSSES IN MATHEMATICAL TRAINING OF STUDENTS IN TECHNICAL DISCIPLINES

CHUMAK L.O., *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

Department of Physics and Applied Mathematics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: larisa4umak@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

Abstract. *The relevance of the work.* Mathematical skills are fundamental for successful functioning in numerous personal and professional domains. The issue of educational losses in students' mathematical preparation is of particular importance, as it may lead to serious and long-lasting negative consequences both for individual career trajectories and for the development of society at large. In the context of globalization and the digital transformation of the economy, the quality of mathematics education becomes a key factor in ensuring the competitiveness of graduates in the labor market. *The purpose of the research.* The study aims to identify the causes of educational losses in students' mathematical training, analyze their consequences, and explore effective ways of addressing the problem within the framework of modern higher education. *Methodology.* To accomplish the stated objective, a comprehensive methodological framework was employed, including the analysis of scholarly literature, empirical investigation through surveys of students and faculty members, statistical processing of the collected data, and a comparative examination of educational practices across different countries. This approach provides a multidimensional perspective on the problem and allows for the integration of both theoretical and practical insights. *Practical value.* The outcomes of this study may serve as a valuable resource for higher education instructors, educational policymakers, and curriculum designers, informing evidence-based strategies and policy initiatives aimed at strengthening the quality and effectiveness of mathematics education in

universities. They may also serve as a foundation for shaping educational policy aimed at reducing learning losses and improving students' academic performance. **Results.** Educational losses in students' mathematical preparation are inherently multifactorial. Their mitigation requires a systemic and holistic strategy that integrates curriculum reform, the modernization of teaching methodologies, the implementation of innovative learning technologies, and the creation of inclusive and supportive educational environments. Prospects for further research involve the development of monitoring models for educational losses and the evaluation of the effectiveness of proposed strategies in diverse educational contexts.

Keywords: *educational losses; mathematics education; adaptive learning; individualization; digital platforms; distance learning*

Постановка проблеми. У сучасному світі, що постійно змінюється та розвивається, математичні компетенції є однією з базових складових загальної освіченості людини. І це не лише знання формул чи вміння обчислювати – це ключові навички, що дозволяють успішно функціонувати у повсякденному житті та приймати обґрунтовані рішення в професійній діяльності.

Математична грамотність охоплює здатність логічно мислити, аналізувати інформацію, інтерпретувати дані, моделювати ситуації та вирішувати проблеми, що виникають у різних життєвих контекстах.

У більшості професій, навіть тих, що не пов'язані напряму з математикою, працівники використовують її елементи. Наприклад, будівельники виконують точні вимірювання, обчислюють площу та об'єм матеріалів, менеджери аналізують звіти, графіки, фінансові показники.

У сучасну цифрову епоху математичні навички стають особливо важливими. Вони відіграють ключову роль не лише в науці, економіці та технічних галузях, а й у щоденному житті – від планування особистого бюджету та аналізу ризиків до тлумачення новин зі статистичними даними.

В умовах трансформації освітнього простору питання якості математичної підготовки студентів набуває особливої актуальності. Проте останні роки засвідчили тенденцію до зниження рівня математичних знань серед студентів, що негативно позначається на їхній академічній успішності та професійній підготовці.

Виділення невирішеної проблеми. За результатами міжнародного дослідження якості освіти PISA-2022 [1], рівень

математичних знань учнів у більшості країн світу помітно погіршився порівняно з 2018 роком. Цінність досліджень PISA полягає не тільки у висвітленні проблем з освітою, а й у всебічному аналізі факторів впливу на формування математичної компетенції підлітків, визначенні об'єктивних причин зниження рівня знань та вмінь школярів різного віку.

Проблема втрат у математичній освіті студентів не повинна залишатися поза увагою, адже вона здатна вплинути не лише на життєві перспективи окремої людини, а й на розвиток суспільства загалом. Зниження рівня математичної грамотності серед молоді ускладнює їхню адаптацію до вимог сучасного ринку праці, де дедалі більше цінується здатність до аналітичного мислення, роботи з даними та вирішення складних задач.

Крім того, слабка математична база обмежує можливості студентів у здобутті якісної вищої освіти, особливо у технічних та природничих спеціальностях. Це, своєю чергою, може призвести до дефіциту кваліфікованих кадрів у критично важливих галузях, що негативно позначиться на інноваційному потенціалі країни.

Таким чином, подолання освітніх втрат у математичній підготовці студентів має стати пріоритетом освітньої політики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки з'явилося чимало досліджень, які підтверджують факт освітніх втрат, особливо в галузі математики. Так, за даними ЮНЕСКО [2], у світі понад 70 % учнів втратили значну частину навчального матеріалу, зокрема математичних знань, через пандемію COVID-19. Також зазначено, що в учнів і студентів, які навчались онлайн або з

перебоями, спостерігається зниження результатів з математики на 10–20 % порівняно з попередніми роками.

Згідно звіту Світового банку “*Simulating the Potential Impacts of COVID-19 School Closures*” (2021) [3], закриття шкіл через COVID-19 залишило понад мільярд учнів поза навчальним процесом. За песимістичним сценарієм, це може призвести до втрати 0,6 року якісного навчання, зменшуючи середню тривалість базової освіти з 7,9 до 7,3 років. У середньому кількість учнів, які не досягають мінімального рівня знань, може зрости з 40 % до 50 % серед дітей середнього шкільного віку. Загальні втрати для всього покоління учнів можуть сягнути 10 трильйонів доларів (у цінах 2017 року), що становить близько 16 % інвестицій урядів у базову освіту цього покоління.

Одним із джерел, що підтверджує ці тенденції, є дослідження [4], проведене Центром освітньої політики при Гарвардському університеті та Проектом освітньої можливості при Стенфордському університеті. Воно зазначило, що освітні втрати внаслідок пандемії вплинули на всі громади, незалежно від раси або доходу студентів. Дослідження також показало, що деякі громади, де студенти відставали більше ніж на 1,5 роки в математиці, повинні будуть викладати 150 % звичайного річного матеріалу протягом трьох років, щоб надолужити втрати.

Невтішні результати [1] дослідження PISA-2022 активували дискусії щодо стану середньої освіти в Україні. У звіті зафіксовано зниження математичної грамотності серед українських школярів, особливо в регіонах, що постраждали від бойових дій або окупації.

За результатами опитувань і досліджень [5–8] Національної академії педагогічних наук (НАПН), понад 60 % українських студентів мають труднощі з математикою після дистанційного навчання. У багатьох вишах спостерігається зниження успішності на першому курсі [9; 10], особливо серед випускників 2020–2022 років.

Проблема освітніх втрат у математичній підготовці студентів активно досліджується як в українському, так і в міжнародному науковому просторі. Багато дослідників наголошують на тому, що якість математичної освіти є критичним чинником успішності студентів у технічних, економічних та природничих спеціальностях [11; 12].

Згідно з дослідженнями Anderson [13] та Zhao [14], освітні втрати часто пов’язані з розривом між шкільною та університетською програмою, що створює труднощі адаптації для першокурсників. Особливо це проявляється у темах, які потребують абстрактного мислення, таких як математичний аналіз, лінійна алгебра та теорія ймовірностей.

Інші автори (Семенова [11]; Дробот [15]) звертають увагу на психологічні аспекти: низька мотивація, страх перед складністю предмета, а також відсутність індивідуального підходу до студентів з різним рівнем підготовки.

Окремо аналізується вплив дистанційного навчання на якість математичної освіти. Дослідження, проведені під час пандемії COVID-19 (Davis et al. [16]; Гончаренко [17]), показали, що відсутність живого контакту з викладачем, технічні труднощі та зниження самодисципліни призвели до значного погіршення результатів у математичних дисциплінах.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про багатофакторність проблеми освітніх втрат у математичній підготовці студентів.

Національні дослідження вказують на зниження середнього рівня знань з математики серед першокурсників, особливо в технічних спеціальностях.

Міжнародні порівняння (наприклад, результати PISA) демонструють, що освітні втрати в математиці є глобальним явищем, але в країнах з менш розвинутою цифровою інфраструктурою вони більше виражені.

Психолого-педагогічні дослідження підкреслюють, що дистанційне навчання знижує рівень когнітивної активності

студентів, що особливо критично для точних наук.

Це створює підґрунтя для подальшого емпіричного дослідження, спрямованого на виявлення конкретних причин освітніх втрат та розробку практичних рекомендацій.

Метою дослідження є виявлення причин освітніх втрат у математичній підготовці студентів технічних спеціальностей, аналіз їх наслідків та пошук шляхів подолання проблеми в контексті сучасної вищої освіти. Об'єктом дослідження виступає процес математичної підготовки студентів, а предметом – чинники, що впливають на її якість.

Для досягнення мети дослідження було застосовано комплексний підхід, що поєднує кількісні та якісні методи аналізу.

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів. Освітні втрати – це зниження рівня знань, навичок та компетентностей учнів і студентів через різні зовнішні та внутрішні фактори. Освітні втрати також можна визначити як розрив між очікуваним рівнем знань і навичок студентів та фактичними результатами їх навчання.

Математика – дисципліна, що будується поступово: від простого до складного. Втрата базових знань (наприклад, алгебраїчних операцій, геометричних понять або логіки розв'язання задач) значно ускладнює подальше засвоєння матеріалу.

Причини освітніх втрат. Освітні втрати у математичній підготовці студентів мають багатофакторну природу. Їх виникнення зумовлене як зовнішніми обставинами, так і внутрішніми системними недоліками освітнього процесу.

Аналіз статистичних даних [18] за 2023–2024 навчальний рік дозволяє виділити наступні ключові групи чинників.

Соціально-політичні чинники:

• **воєнні дії та міграція.** За даними Інституту освітньої аналітики, у 2023/24 навчальному році понад 1,3 млн здобувачів освіти були переміщені або навчалися в умовах тимчасового переміщення.

• **економічна нестабільність.** Зниження фінансування освіти, особливо в регіонах, що

постраждали від бойових дій, обмежує доступ до якісної математичної підготовки.

Технологічні виклики:

• **цифрова нерівність.** За оцінками освітніх експертів, понад 20 % студентів не мають стабільного доступу до інтернету або сучасних пристроїв для дистанційного навчання.

• **недосконалість онлайн-платформ.** Більшість платформ не адаптовані до викладання математики, що потребує інтерактивності, графіки та символічного введення.

Психологічні та когнітивні чинники:

• **зниження концентрації уваги.** Студенти повідомляють про труднощі з фокусуванням під час онлайн-занять, особливо при вивченні абстрактних тем.

• **тривожність і стрес.** За даними освітніх психологів, до 40 % студентів відчувають емоційне виснаження, що негативно впливає на здатність до навчання.

• **втрата мотивації.** В умовах нестабільності студенти часто не бачать практичної цінності математичних знань.

Педагогічні чинники:

• **нестача кваліфікованих кадрів.** У деяких ЗВО спостерігається дефіцит викладачів математики, особливо в регіонах, де освітні установи були евакуйовані або реорганізовані.

• **формалізація навчального процесу.** Замість глибокого засвоєння матеріалу студенти орієнтуються на проходження тестів та формальне оцінювання.

• **відсутність індивідуального підходу.** Масовість онлайн-навчання ускладнює персоналізовану підтримку.

Методологічні проблеми:

• **складність предмету.** Математика потребує системного підходу, який важко реалізувати без очного контакту.

• **відрив теорії від практики.** Недостатня кількість прикладних задач знижує мотивацію до вивчення.

• **невідповідність програм сучасним викликам.** Освітні програми часто не враховують потреби цифрової економіки та міждисциплінарного підходу.

Занепокоює формалізація навчального процесу, яка стала наслідком зменшення загальної кількості годин у навчальних планах, особливо для бакалавріату. Освітні програми дедалі більше фокусуються на прикладних навичках, що витісняє фундаментальні теоретичні курси. Навчальний процес зосереджується не на глибокому розумінні знань, а на виконанні формальних вимог: проходженні тестів, отриманні оцінок, дотриманні стандартів.

Формалізація математичної підготовки має негативний вплив на розвиток творчого мислення, інтуїції та здатності до нестандартного розв'язання задач. Наслідками формалізації є зниження мотивації, втрата глибинних знань, підміна цілей освіти, нерівність можливостей та психологічний тиск.

Надмірна формалізація навчання створює також і низку потенційних ризиків. Це й ослаблення аналітичного мислення (менше можливостей розвивати логіку, абстрактне мислення, здатність до моделювання), і слабка підготовка до технічних професій, а також втрата фундаменту для наукової та дослідницької діяльності (без міцної математичної бази складно займатися дослідженнями в природничих і технічних науках).

Наслідки освітніх втрат. Освітні втрати у математичній підготовці студентів мають не лише академічні, а й соціальні, професійні та психологічні наслідки. Вони впливають на якість навчального процесу, конкурентоспроможність випускників та загальний рівень освіченості суспільства.

Академічні наслідки:

- **зниження рівня знань.** За результатами внутрішніх діагностичних тестів, проведених у 2023–2025 роках до 60 % першокурсників не засвоїли базові математичні поняття, необхідні для подальшого навчання. Цей показник добре корелюється з даними офіційних звітів [19] про проведення НМТ.

Наприклад, із завданням, у якому треба було розкласти квадратичний вираз на множники за формулою різниці квадратів, успішно впоралися 44 % учасників НМТ-

2024, а правильно піднесли до квадрата двочлен лише третина тестованих. Слід зазначити, що в довідкових матеріалах НМТ були наведені всі потрібні формули, які учасники мали лише правильно дібрати й використати.

- **проблеми з адаптацією до навчального навантаження.** Вища математика – одна з найбільш складних дисциплін у технічних спеціальностях. Саме тут першокурсники найчастіше стикаються з труднощами адаптації до темпу навчання через великий обсяг матеріалу та абстрактність понять.

Засвоєння математики відбувається як процес наростання когнітивної складності: від практичного мислення до теоретичного узагальнення та формування абстрактних концептів. У межах освітнього процесу базові знання часто залишаються для самостійного опрацювання, що відповідає принципам розвитку автономності та формування навичок самостійної навчальної діяльності.

- **зниження середнього балу.** На деяких спеціальностях середній бал з математики знизився на 5–12 % порівняно з довоєнним періодом.

Професійні наслідки:

- **обмежена готовність до виконання професійних завдань.** Молоді спеціалісти виходять на ринок праці без достатнього рівня володіння інструментами математичного моделювання, статистичного аналізу та роботи з даними. Це ускладнює їхню здатність приймати обґрунтовані рішення, прогнозувати результати та ефективно застосовувати сучасні технології у своїй сфері.

- **зниження конкурентної позиції на ринку праці.** Недостатні математичні компетенції зменшують привабливість випускників для роботодавців, особливо у сферах, де точні розрахунки та аналітика є основою (ІТ, інженерія, фінанси, економіка, наукові дослідження). Це призводить до того, що компанії частіше віддають перевагу кандидатам з інших країн або тим, хто здобув додаткову освіту.

- *втрата потенціалу для інновацій та розвитку галузей.* Ослаблення математичної підготовки обмежує здатність молодих фахівців брати участь у складних проєктах, створювати нові технологічні рішення та впроваджувати інновації. Це може сповільнити розвиток цілих секторів економіки.

- *зростання потреби у додатковому навчанні.* Роботодавці змушені інвестувати більше ресурсів у перепідготовку та підвищення кваліфікації нових працівників, що збільшує витрати бізнесу та знижує загальну ефективність.

Психологічні наслідки труднощів у вивченні математики мають комплексний характер і проявляються на рівні особистісної мотивації, емоційного стану та освітньої траєкторії студентів.

Систематичні невдачі у засвоєнні математичних знань призводять до зниження самооцінки та формування відчуття некомпетентності, що, у свою чергу, зумовлює підвищення рівня навчальної тривожності. Негативне ставлення до математики як «непотрібної» або «недоступної» дисципліни сприяє відчуженню від STEM-напрямів, зменшенню інтересу до науково-технічних спеціальностей та обмежує можливості професійного самовизначення.

Емоційне виснаження, спричинене повторюваними невдачами, має довготривалий вплив на загальну навчальну мотивацію, що проявляється у виборі менш складних дисциплін та униканні курсів із математичним компонентом.

Таким чином, психологічні бар'єри у навчанні математики не лише *погіршують індивідуальні освітні результати*, але й *формують системні ризики* для розвитку кадрового потенціалу у сфері STEM.

Суспільні наслідки освітніх втрат у математиці виходять далеко за межі індивідуальної академічної успішності. Вони створюють довготривалі виклики для забезпечення соціальної рівності, підтримання економічної стійкості та формування інноваційного потенціалу суспільства.

Подолання освітніх втрат у математиці в Україні у 2023–2024 роках здійснювалося через поєднання державних стратегій, локальних програм закладів освіти та методичної підтримки викладачів. Була запроваджена низка ініціатив, які поєднують інституційні, міждисциплінарні та практичні підходи.

У 2025 році акцент у подоланні освітніх втрат з математики зміщується на систематичну діагностику знань, розширення методичної підтримки викладачів та залучення міжнародних партнерів.

Державні стратегії. Міністерство освіти і науки України розробило [20] *рекомендації щодо організації програм з надолуження освітніх втрат*, зокрема у математиці. Враховувалися фактори війни: переривання навчання через тривоги, відсутність електроенергії, психологічні труднощі учнів.

Також було створено *національні рамки підтримки*: методичні матеріали, онлайн-ресурси, інтеграція програм від UNICEF та інших партнерів. У методичних рекомендаціях для 2025/2026 н.р. міністерство освіти та наукові інститути радять проводити *діагностувальні роботи на початку навчального року* та збільшувати час на повторення матеріалу попереднього року.

За результатами моніторингу якості освіти у 2024 році сформульовано рекомендації для місцевих органів управління освітою. Вони стосуються *забезпечення доступу до якісної освіти*, усунення типових недоліків та підготовки до сертифікації педагогів у 2026 році.

У січні 2025 року громадська організація «Українські гуманітарні ініціативи» спільно з ЮНІСЕФ організувала *тренінг для вчителів математики*. Мета – надати педагогам сучасні стратегії та інструменти для подолання освітніх втрат, підвищення мотивації учнів і якості викладання.

Більшість державних стратегій і рекомендацій щодо подолання освітніх втрат у математиці в Україні наразі спрямовані саме на загальну середню освіту. Для вищої освіти системних державних програм поки

що немає; університети здебільшого самостійно адаптують навчальні плани та вводять додаткові курси чи підтримку для студентів.

Локальні програми закладів освіти. Школи та університети створюють власні плани з подолання освітніх втрат, які включають: додаткові консультації та факультативи з математики; використання онлайн-платформ і цифрових ресурсів; інтеграцію міждисциплінарних підходів (поєднання математики з інформатикою, фізикою, економікою).

Можна виділити конкретні інструменти підтримки:

- *діагностичні тести* для визначення рівня знань студентів та виявлення прогалин;
- *індивідуальні освітні траєкторії* – персоналізовані плани навчання для студентів із різним рівнем підготовки;
- *«математичні стартапи»* – додаткові заняття, літні школи та онлайн-курси для абітурієнтів і першокурсників, щоб компенсувати прогалини;
- *гнучкі графіки та модульне навчання:* Університети впроваджують короткі інтенсиви з математики, що дозволяє студентам надолужити пропущене;
- *методичні матеріали для викладачів* – збірники завдань, рекомендації щодо організації занять у змішаному форматі;
- *психологічна підтримка* – врахування стресових факторів війни та створення безпечного освітнього середовища.
- *використання Moodle, Google Classroom, MS Teams, інтерактивних симуляцій та онлайн-бібліотек* для самостійної роботи студентів. МОН України домовилося з провідними освітніми платформами про безкоштовний доступ для студентів. Це дозволяє проходити тисячі курсів, зокрема з математики та суміжних дисциплін;
- *менторські програми.* Старші студенти та аспіранти допомагають першокурсникам у засвоєнні складних тем.

Таким чином, підтримка студентів у математичній освіті реалізується через локальні ініціативи університетів та доступ до міжнародних онлайн-курсів. Немає єдиної

політики чи фінансування для подолання освітніх втрат.

Додаткові заходи часто не оплачуються окремо й не враховуються в офіційному навантаженні викладача. Держава не виділяє окремих ресурсів для компенсації освітніх втрат у вищій освіті, і університети змушені покладатися на ентузіазм та додаткову працю викладачів.

Методична підтримка викладачів закладів вищої освіти (ЗВО) щодо подолання освітніх втрат з математики в Україні поки що не має централізованої державної стратегії. Основні матеріали й рекомендації розробляються для шкільного рівня, але університети адаптують їх під власні потреби, використовуючи локальні методичні розробки, онлайн-курси та індивідуальні програми підтримки студентів.

У контексті методичної підтримки викладачів ЗВО можна зазначити наступні інституційні ініціативи.

Круглі столи та обмін досвідом. Мала академія наук України організує фахові дискусії щодо подолання освітніх втрат, де формуються практичні рекомендації для ЗВО. На цих заходах обговорюються проблемні кейси (наприклад, як працювати зі студентами, які мають значні прогалини після дистанційного навчання), презентуються успішні практики подолання освітніх втрат у математиці. Не менш важливим результатом є формування спільноти викладачів, які обмінюються досвідом і підтримують одне одного.

Іншим напрямком методичної підтримки викладачів ЗВО є **підвищення кваліфікації**, яке реалізується у формі онлайн-курсів від МОН, МАН та міжнародних партнерів (Coursera, Prometheus, EdEra), очних семінарів та тренінгів у педагогічних університетах, програм підвищення кваліфікації з видачею сертифікатів.

Серед основних напрямків курсів та тренінгів можна виділити наступні:

- *цифрова педагогіка:* як ефективно використовувати онлайн-платформи, інтерактивні інструменти та електронні ресурси для викладання математики;

- *адаптивне навчання*: методики діагностики рівня знань студентів і побудова індивідуальних траєкторій навчання.

- *робота з вразливими студентами*: психологічні та педагогічні підходи до підтримки тих, хто має значні освітні втрати або перебуває у складних життєвих умовах (наприклад, студенти-переселенці).

Очікуваним ефектом має бути не тільки зростання якості викладання математичних курсів у ЗВО, а і формування культури постійного професійного розвитку викладачів.

Таким чином, методична підтримка викладачів ЗВО включає як *професійні дискусії та обмін досвідом*, так і *системне підвищення кваліфікації*. Це створює умови для того, щоб університети могли більш ефективно компенсувати освітні втрати студентів у математиці.

У міжнародній практиці методична підтримка викладачів вищої освіти щодо подолання освітніх втрат з математики реалізується через *спільні проєкти університетів, курси підвищення кваліфікації, адаптивні програми для першокурсників та професійні мережі обміну досвідом*. ЄС та США активно інвестують у такі ініціативи, щоб допомогти викладачам працювати зі студентами, які мають прогалини у знаннях після школи чи пандемії.

ЄС робить акцент на інклюзивності та адаптації першокурсників, тоді як США інвестують у розвиток викладачів та цифрові інструменти. Для України корисно було б запозичити практику *bridge courses* та системного фінансування підвищення кваліфікації викладачів.

Bridge Courses (курси-перехідники): університети США та ЄС організують літні чи семестрові курси для першокурсників, щоб вирівняти рівень знань з математики.

Адаптація для України: можна створити короткі інтенсиви перед початком навчального року для студентів, які мають прогалини після школи чи дистанційного навчання. Потрібно офіційне включення таких курсів у навчальні плани.

Підвищення кваліфікації викладачів: Національний науковий фонд США фінансує програми з цифрової педагогіки та роботи з вразливими студентами.

Адаптація: українським викладачам варто пропонувати фінансовані сертифіковані курси з адаптивного навчання, психологічної підтримки студентів та використання цифрових інструментів. Потрібно виділення окремих годин та фінансування для викладачів.

Висновки та перспективи розвитку напрямку. Освітні втрати у математичній підготовці студентів – це не тимчасова проблема, а довгостроковий виклик, що потребує системного реагування.

Проведене дослідження підтвердило наявність суттєвих освітніх втрат у математичній підготовці студентів, що негативно впливають на їхню академічну успішність, мотивацію та здатність до подальшого професійного розвитку.

Виявлено, що ці втрати мають багатофакторну природу: вони зумовлені як недостатньою базовою підготовкою, так і психологічними бар'єрами, неефективними методами викладання та впливом дистанційного навчання.

Аналіз успішності та результатів анкетування студентів і викладачів дозволив сформулювати цілісне уявлення про масштаби та характер проблеми. Зокрема, встановлено, що зниження мотивації та впевненості у власних силах є не менш критичним, ніж академічні труднощі, а педагогічна гнучкість і підтримка студентів відіграють ключову роль у подоланні освітніх втрат.

Виявлено розбіжності в методах компенсації освітніх втрат. Так, у закладах середньої освіти, акцент робиться на відновленні базових знань та мотивації, тоді як у ЗВО – на адаптації студентів до складних курсів, інтеграції математики з професійними дисциплінами та міжнародній співпраці.

Встановлені основні інструменти подолання освітніх втрат: моніторинг, діагностика, корекційні програми і фінансова підтримка навчання.

Запропоновані рекомендації: адаптація навчальних програм, впровадження інноваційних методик, розвиток системи підтримки студентів та професійне зростання викладачів, можуть стати основою для стратегічних змін у системі математичної

освіти. Їх реалізація сприятиме формуванню більш ефективного, доступного та мотивуючого освітнього середовища, здатного забезпечити якісну математичну підготовку студентів у контексті сучасної вищої освіти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бичко Г. та ін. PISA-2022 : основні результати та висновки. Що знають і вміють українські 15-річні учні. Київ : УЦОЯО, 2023. 24 с. URL: https://osvita.ua/doc/files/news/907/90712/PISA-2022_Nacionalnij_zvit_korotkij.pdf
2. Learning losses from COVID-19 school closures could impoverish a whole generation. URL: <https://www.unesco.org/en/articles/learning-losses-covid-19-school-closures-could-impoverish-whole-generation>
3. Simulating the Potential Impacts of COVID-19 School Closures on Schooling and Learning Outcomes : A set of Global Estimates. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/education/publication/simulating-potential-impacts-of-covid-19-school-closures-learning-outcomes-a-set-of-global-estimates>
4. New Research finds that pandemic learning loss impacted whole communities, regardless of student race or income. Center for Education Policy Research. Harvard University. URL: <https://cepr.harvard.edu/news/new-research-finds-pandemic-learning-loss-impacted-whole-communities-regardless-student?form=MG0AV3>
5. Regina De Dominicis, UNICEF Regional Director for Europe and Central Asia. Widespread learning loss among Ukraine's children, as students head back to school. 2023. URL: <https://www.unicef.org/ukraine/press-releases/widespread-learning-loss>
6. Topuzov O., Lokshyna O., Holovko M. Learning losses: the complexity of problem in the context of war in Ukraine. *Education : Modern Discourses*. 2023. № 6. Pp. 7–17. URL: <https://surli.cc/sbhtjr>
7. Мальований Ю. І. Дистанційне навчання: реалії і перспективи. *Вісник НАПН України*. 2020. Т. 2, № 1. С. 1–3.
8. Іванюк І. В. Виклики дистанційного навчання в Україні в умовах карантину COVID-19. *Вісник НАПН України*. 2021. Т. 3, № 2. С. 1–4.
9. Зазимко О. В., Кот А. О. Труднощі студентів у дистанційному навчанні. *Science and practice in the era of globalization : Abstracts of I International Scientific and Practical Conference* (January 29–30, 2021, Rotterdam, Netherlands). Pp. 39–41. URL: <I-Conference-Science-and-practice-in-the-era-of-globalization.pdf>
10. Ковальчук О. В. Проблеми математичної освіти у вищій школі. *Вісник педагогіки*. 2020. № 3. С. 45–52.
11. Семенова І. М. Мотиваційні аспекти навчання математики у студентів технічних спеціальностей. *Освіта і розвиток*. 2021. № 2. С. 33–39.
12. Ivanova S., Petrov A. Складання задач як засіб формування математичної компетентності учнів. 2019. URL: <http://dspace.pdpu.edu.ua/bitstream/123456789/11961/1/Ivanova%20Svitlana%202019%20.pdf>
13. Anderson J. Bridging the Gap : High School Math and College Readiness. New York : Academic Press, 2018.
14. Zhao L. Online Learning and Mathematics Performance during COVID-19. *Journal of Educational Research*. 2021. Vol. 45 (2). Pp. 112–125.
15. Дробот О. В. Мотивація студентів до дистанційного навчання в умовах пандемії. *Психологія та соціальна робота*. 2020. Вип. 1 (51). С. 69–85.
16. Davis R., Nguyen T., Patel S. The Impact of Remote Instruction on STEM Education. *International Journal of Higher Education*. 2022. Vol. 11 (1). Pp. 88–97.
17. Гончаренко Л. В. Вплив дистанційного навчання на засвоєння математичних знань студентами. *Освітній дискурс*. 2021. № 4. С. 21–27.
18. Основні освітні статистичні дані (2023–2024 навчальний рік). Інститу освітньої аналітики. URL: [Освітні_освітні_статистичні_дані_\(2023/24_навчальний_рік\)](Освітні_освітні_статистичні_дані_(2023/24_навчальний_рік)) – Освіта.UA
19. Офіційний звіт про проведення НМТ у 2024 році. URL: <https://testportal.gov.ua/ofzvit/>
20. Рекомендації щодо організації програм з надолуження освітніх втрат. МОН України. URL: <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/news/2023/07/31/Unicef.Immmediate.actions.frame.proofreading.ua.1-31.07.2023.pdf>

REFERENCES

1. Bychko H. and oth. PISA-2022 : osnovni rezultaty ta vysnovky. Shcho znaiut i vmiiut ukrainiski 15-richni uchni [PISA-2022 : main results and conclusions. What Ukrainian 15-year-old students know and can do]. Kyiv : UTsOIAO, 2023, 24 p. URL: https://osvita.ua/doc/files/news/907/90712/PISA-2022_Nacionalnij_zvit_korotkij.pdf (in Ukrainian).
2. Learning losses from COVID-19 school closures could impoverish a whole generation. URL: <https://www.unesco.org/en/articles/learning-losses-covid-19-school-closures-could-impoverish-whole-generation>

3. Simulating the Potential Impacts of COVID-19 School Closures on Schooling and Learning Outcomes : A set of Global Estimates. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/education/publication/simulating-potential-impacts-of-covid-19-school-closures-learning-outcomes-a-set-of-global-estimates>
4. New Research finds that pandemic learning loss impacted whole communities, regardless of student race or income. Center for Education Policy Research. Harvard University. URL: <https://cepr.harvard.edu/news/new-research-finds-pandemic-learning-loss-impacted-whole-communities-regardless-student?form=MG0AV3>
5. Regina De Dominicis, UNICEF Regional Director for Europe and Central Asia. Widespread learning loss among Ukraine's children, as students head back to school. 2023. URL: <https://www.unicef.org/ukraine/press-releases/widespread-learning-loss>
6. Topuzov O., Lokshyna O. and Holovko M. Learning losses : the complexity of problem in the context of war in Ukraine. Education : Modern Discourses. 2023, no. 6, pp. 7–17. URL: <https://surli.cc/sbhtjr>
7. Malovanyi Yu.I. *Dystantsiine navchannia : realii i perspektyvy* [Distance learning : realities and prospects]. *Visnyk NAPN Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2020. Vol. 2, no.1, pp. 1–3. (in Ukrainian).
8. Ivaniuk I.V. *Vyklyky dystantsiinoho navchannia v Ukraini v umovakh karantynu COVID-19* [Challenges of distance learning in Ukraine under COVID-19 quarantine conditions]. *Visnyk NAPN Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2021, vol. 3, no. 2, pp. 1–4. (in Ukrainian).
9. Zazymko O.V. and Kot A.O. *Trudnoshchi studentiv u dystantsiinomu navchanni* [Students' difficulties in distance learning]. Science and practice in the era of globalization : Abstracts of I International Scientific and Practical Conference (January 29–30, 2021, Rotterdam, Netherlands), pp. 39–41. URL: [I-Conference-Science-and-practice-in-the-era-of-globalization.pdf](#) (in Ukrainian).
10. Kovalchuk O.V. *Problemy matematychnoi osvity u vyshchii shkoli* [Problems of mathematical education in higher education]. *Visnyk pedahohiky* [Bulletin of Pedagogy]. 2020, no. 3, pp. 45–52. (in Ukrainian).
11. Semenova I.M. *Motyvatsiini aspekty navchannia matematyky u studentiv tekhnichnykh spetsialnostei* [Motivational aspects of teaching mathematics to students of technical specialties]. *Osvita i rozvytok* [Education and Development]. 2021, no. 2, pp. 33–39. (in Ukrainian).
12. Ivanova S. and Petrov A. *Skladannia zadach yak zasib formuvannia matematychnoi kompetentnosti uchniv* [Problem-solving as a means of developing students' mathematical competence]. 2019. URL: <http://dspace.pdpu.edu.ua/bitstream/123456789/11961/1/Ivanova%20Svitlana%202019%20.pdf> (in Ukrainian).
13. Anderson J. *Bridging the Gap : High School Math and College Readiness*. New York : Academic Press, 2018.
14. Zhao L. Online Learning and Mathematics Performance during COVID-19. *Journal of Educational Research*. 2021, vol. 45 (2), pp. 112–125.
15. Drobot O.V. *Motyvatsiia studentiv do dystantsiinoho navchannia v umovakh pandemii* [Motivating students for distance learning during a pandemic] *Psykhohohiia ta sotsialna robota* [Psychology and Social Work]. 2020, vol. 1 (51), pp. 69–85. (in Ukrainian).
16. Davis R., Nguyen T. and Patel S. The Impact of Remote Instruction on STEM Education. *International Journal of Higher Education*. 2022, vol. 11 (1), pp. 88–97.
17. Honcharenko L.V. *Vplyv dystantsiinoho navchannia na zasvoiennia matematychnykh znan studentamy* [The impact of distance learning on students' acquisition of mathematical knowledge]. *Osvitnii dyskurs* [Educational Discourse]. 2021, no. 4, pp. 21–27. (in Ukrainian).
18. *Osnovni osvitni statystychni dani (2023–2024 navchalnyi rik)*. *Institutu osvitnoi analityky* [Basic educational statistics (2023–2024 academic year). Institute of Educational Analytics]. URL: [ОСНОВНІ ОСВІТНІ СТАТИСТИЧНІ ДАНІ \(2023/24 НАВЧАЛЬНИЙ РІК\) – Освіта.UA](#) (in Ukrainian).
19. *Ofitsiynyi zvit pro provedennia NMT u 2024 rotsi* [Official report on the conduct of the NMT in 2024]. URL: <https://testportal.gov.ua/ofzvit/> (in Ukrainian).
20. *Rekomendatsii shchodo orhanizatsii prohram z nadoluzhennia osvity vtriat. MON Ukrainy* [Recommendations on the organization of programs to compensate for educational losses. Ministry of Education and Science of Ukraine]. URL: <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/news/2023/07/31/Unicef.Immediate.actions.frame.proofreading.ua.1-31.07.2023.pdf> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 29.01.2026.

УДК 691.32

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.135.1234

ЕФЕКТИВНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ФОСФОГІПСУ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

ШИНКЕВИЧ О. І.¹, асп.,
СМОЛІН Д. О.^{2*}, асп.

¹ Кафедра автомобільних доріг та аеродромів, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4-а, 65004, Одеса, Україна, тел. +38 (0939) 79-99-22, e-mail: elena_shinkevich@ukr.net, ORCID ID: 0009-0006-2906-4958

^{2*} Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та 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 (0562) 47-16-22, e-mail: smolin.d.a@i.ua, ORCID ID: 0009-0007-0586-1861

Анотація. Постановка проблеми. Скупчення техногенних відходів справедливо вважається одним з головних джерел забруднення біосфери, проте цю задачу раціонально розглядати як джерело додаткових ресурсів для отримання широкої гами будівельних матеріалів різного призначення. Даний підхід є не тільки раціональним, але і необхідним, оскільки сприяє збереженню природних ресурсів і економічній безпеці не тільки людини, але і флори та фауни. У даній ситуації актуальним для сучасного суспільства є питання не просто утилізації, обробки та застосування їх, а також збільшення обсягу техногенної сировини в загальному обсязі будівельних сумішей, з урахуванням санітарно-виробничої служби та безпеки життєдіяльності людини. Одним з можливих варіантів може бути розробка та впровадження щільних покриттів для відвалів, але такий підхід не сприяє звільненню родючих земель. У багатьох розвинених країнах світу ведеться будівництво доріг з фосфогіпсу. Нині високу оцінку отримала екологічна безпека та економічна ефективність доріг з фосфогіпсу, що значно здешевлює дорожнє будівництво. Однак необхідні подальші науково-дослідні розробки для розвитку перспектив дорожньо-будівельної галузі. **Мета статті** – підвищення експлуатаційно-будівельних властивостей дорожнього бетону з техногенної сировини у вигляді гіпсового в'язучого з фосфогіпсу, модифікованого комплексом поліфункціональних органічних добавок і полідисперсних мінеральних наповнювачів. На першому етапі проведено вибір і обґрунтування комплексу поліфункціональних органічних добавок, зокрема карбоксилатної гідрофобної добавки. В якості комплексу полідисперсних мінеральних наповнювачів застосовано кварцовий пісок або більш відомий як черепашник, воластонітові мікрофібра трьох фракцій. Всі компоненти суміші: наповнювачі, гіпсове в'язуче з фосфогіпсу, органічні добавки виготовлялися у вигляді сухих будівельних сумішей, для полегшення дорожньо-будівельних робіт. **Висновки.** Проведено порівняння економічної ефективності техногенного фосфогіпсу та будівельного гіпсу. Застосування нових «полегшених» технологій забезпечує багаторазове скорочення часу термічної обробки та високу дисперсність гіпсового в'язучого з фосфогіпсу. Встановлено раціональність спільної обробки фосфогіпсу з кварцовим піском або вапняком-черепашником. Досліджено вплив просторово-тимчасових, нелінійних процесів на основні показники якості. Так, в результаті диспергування величина питомої поверхні збільшується з $S_{\text{пит.}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$ до $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ при однаковій тривалості обробки в межах 8-10 хв, що забезпечує підвищення $F_{\text{ст}}$ з 3,5 до 5,0 МПа, $F_{\text{виг.}}$ – з 0,1 до 1,0 МПа. Досліджено та проаналізовано закономірності впливу на не структурно-реологічні властивості суміші та фізико-механічні властивості затверділих матеріалів компонентних, органічних та полідисперсних неорганічних добавок-наповнювачів. З використанням ЕС моделювання проведено порівняльний аналіз взаємовпливу сумісності всіх компонентів між собою. Як варіюванні фактори використано карбонатну добавку Sika, гідрофобізатор Wait, метакаолін і тривимірну воластонітову фібру. Досліджено основні властивості: водопотребу, терміни тужавлення, міцність при стиску, опір розтягу при згині, водо- та тріщиностійкість. У результаті проведених досліджень запропоновано склади у вигляді сухих будівельних сумішей для основ дорожнього полотна автомобільних доріг.

Ключові слова: техногенна сировина; фосфогіпс; сухі будівельні суміші; дорожнє полотно; основа доріг; органічні добавки; мінеральні наповнювачі

EFFECTIVE USE OF PHOSPHOGYPSUM IN THE CONSTRUCTION OF MOTORWAYS

SHYNKEVYCH O.I.¹, Postgrad. Stud.,
SMOLIN D.O.^{2*}, Postgrad. Stud.

¹ Department of Automobile Roads and Airfields, Odes'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4-a, Didrikhson St., Odesa, 65004, Ukraine, tel. +38 (0939) 79-99-22, e-mail: elena_shinkevich@ukr.net, ORCID ID: 0009-0006-2906-4958

^{2*} Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, 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) 47-16-22, e-mail: smolin.d.a@i.ua, ORCID ID: 0009-0007-0586-1861

Abstract. Articulation of issue. The accumulation of man-made waste is rightly considered one of the main sources of pollution of the biosphere, but it is reasonable to view this problem as a source of additional resources for obtaining a wide range of building materials for various purposes. This approach is not only rational but also necessary, as it contributes to the conservation of natural resources and economic security not only for humans but also for flora and fauna. In this situation, the issue of not only recycling, processing and using them, but also increasing the volume of man-made raw materials in the total volume of building mixtures, taking into account sanitary and production services and human life safety, is relevant for modern society. One possible option could be the development and implementation of dense coatings for dumps, but this approach does not contribute to the release of fertile land. In many developed countries around the world, roads are being built using phosphogypsum. Currently, the environmental safety and economic efficiency of phosphogypsum roads, which significantly reduce the cost of road construction, are highly valued. However, further research and development is needed to develop the prospects of the road construction industry. **The purpose of this article** is to improve the operational and construction properties of road concrete made from man-made raw materials in the form of gypsum binder from phosphogypsum, modified with a complex of multifunctional organic additives and polydisperse mineral fillers. At the first stage, a complex of multifunctional organic additives was selected and justified, in particular a carboxylate hydrophobic additive. Quartz sand, better known as shell rock, and volastonite microfibres of three fractions were used as a complex of polydisperse mineral fillers. The mixture: fillers, gypsum binder from phosphogypsum, organic additives were manufactured in the form of dry construction mixtures to facilitate road construction works. **Conclusions.** A comparison of the economic efficiency of technogenic phosphogypsum and building gypsum was carried out. The use of new 'lightweight' technologies provides a significant reduction in heat treatment time and high dispersibility of gypsum binder from phosphogypsum. The rationality of joint processing of phosphogypsum with quartz sand or shell limestone has been established. The influence of spatial-temporal nonlinear processes on key quality indicators has been investigated. Thus, as a result of dispersion, the specific surface area increases from $S_{yg} = 300 \text{ m}^2/\text{kg}$ to $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ with the same processing time within 8–10 minutes, which provides an increase in F_{st} from 3.5 to 5.0 MPa, F_{izg} – from 0.1 to 1.0 MPa. The patterns of influence on the structural and rheological properties of the mixture and the physical and mechanical properties of hardened materials of component, organic and polydisperse inorganic additives-fillers were studied and analysed. Using EC modelling, a comparative analysis of the mutual influence of the compatibility of all components with each other was carried out. The following factors were varied: Sika carbonate additive, Wait water repellent, metakaolin and three-dimensional wollastonite fibre. The main properties were studied: water demand, setting time, compressive strength, flexural tensile strength, water and crack resistance. As a result of the research, compositions in the form of S.S.S. for the bases of motorway roadbeds were proposed.

Keywords: *technogenic raw materials; phosphogypsum; dry building mixtures; roadbed; road base; organic additives; mineral fillers*

Постановка проблеми. Сучасне будівництво доріг перебуває на стадії трансформації, спричиненої зростанням вартості та кількості автомобільного транспорту, а також посиленням екологічних регламентів (ІМО, MARPOL, EEDI/EEEXI). У цьому контексті багатокомпонентні суміші, що поєднують штучні та техногенні компоненти, стають ключовим інструментом для зменшення фінансових, екологічних та економічних витрат. В Україні набуває чинності нова нормативна база, що суттєво підвищує вимоги до енергоефективності в будівельній галузі. Зокрема, ДБН В.1.2-11:2021 «Енергозбереження та енергоефективність». Порівняльний аналіз штучних та техногенних систем показує

суттєві переваги комбінованого підходу. При цьому потрібно, щоб була збільшена кількість техногенних оброблених компонентів у дорожніх шарах. Наразі одним із важливих показників якості дорожнього полотна є довговічність. На довговічність дорожніх бетонів основний вплив має нерациональне використання добавок, порушення технологій приготування, транспортування та укладання бетонної суміші, а також посилення агресивної дії сучасних протипожежних реагентів. Недостатньо враховано комплексний вплив різних добавок на структуру дорожніх бетонів.

Мета дослідження – поліпшення експлуатаційних властивостей основи

дорожнього полотна з фосфогіпсу, модифікованого комплексом поліфункціональних органічних добавок і полідисперсних армуючих мінеральних наповнювачів.

Аналіз досліджень та публікацій.

Існуючі теоретичні уявлення про характер морозного впливу потребують уточнення. Сучасні технології бетонів дозволяють змінювати властивості бетонних сумішей і самих бетонів у широких межах. Для цього використовують комплекси хімічних добавок, тонкоподрібнених наповнювачів, фібри різного походження [1; 2; 15]. Застосування фібри, зокрема поліпропіленової, призводить до зниження міцності бетону при стиску до 25 %. Встановлено, що основним позитивним ефектом дії суперпластифікуючих добавок є зниження водоспоживання, що сприяє ущільненню та зміцненню структури бетону. Однак припущення вчених щодо формування в бетонах із суперпластифікаторами умовно замкнутої мікропористої структури неоднозначні й потребують уточнення [2; 11]. Наведено узагальнену класифікацію мінеральних добавок [4] і показано, що основними ефектами їх дії можуть бути ущільнення мікро- та мезаструктури бетону (добавки, наповнювачі), зв'язування вільної вологи і зниження пористості, кальматації пор і дефектів під впливом хімічно активних добавок [2; 5; 6; 8; 11]. Дослідження (Дворкина Л. І., Вирового В. М., Руновой Р. Ф., Кривенка П. В., Пушкаревой К. К., Ольгинского О. Г.) та застосування мікронаповнювачів сприяє зміні характеру мікропористості затверділого бетону з утворенням дрібних і замкнутих пор підвищенню міцності водо- та корозійній стійкості бетону. Дослідження [2; 6; 8; 9; 11–13] та застосування мікронаповнювачів сприяють зміні характеру мікропористості затверділого бетону з утворенням дрібних і замкнутих пор, підвищенню міцності, водо- та корозійній стійкості бетону. Також важливо те, що наповнювачі знижують об'ємні деформації. При цьому важливу роль

відіграють дисперсність та активність поверхні мікронаповнювача. Також розглянуто досвід застосування різних видів фібри в дорожніх бетонах. Показано, що різні види фібри, зокрема сталева, поліпропіленова, вуглецева, поліамідна, можуть підвищувати деформативні властивості бетонів, що особливо важливо для підвищення довготривалої міцності та тріщиностійкості дорожніх бетонів [1; 6; 7; 12]. Найбільш технологічною для застосування в бетонах є поліпропіленова фібра. Однак досвід застосування поліпропіленової фібри в дорожніх бетонах недостатній [1; 2; 11; 17–19]. Використання відходів різних виробництв є досить важливим шляхом економії матеріальних і енергетичних ресурсів у виробництві дорожніх бетонів. Серед цих відходів важливе місце займають відходи різних підприємств, зокрема відходи фосфогіпсу. Збільшення кількості відходів призводить до утворення відвалів, які займають значні площі чорнозему та сільськогосподарських угідь. Разом із тим раціонально використовувати комплексні в'язкі матеріали, які є техногенним сировинами і відрізняються зниженими економічними показниками. У зв'язку з цим розробка ефективних високоякісних будівельно-дорожніх бетонів, модифікованих комплексами поліфункціональних сумісних між собою органічних добавок та полідисперсних армувальних наповнювачів, є актуальним завданням. Врахування основних вимог до різних добавок, сумісність складових між собою, застосування на ринку України технічного і економічного обґрунтування дозволить підвищити ефективність в'язучих різного виду та бетонів на їх основі. Обсяги й ефективність різних видів добавок постійно зростають, якість і склади добавок постійно вдосконалюються, розширюється їх номенклатура. Для отримання необхідних показників якості та впливу добавок необхідний аналіз їх впливу із застосуванням ЕС-моделювання рецептурно-технологічних рішень удосконалення композиційних в'язучих і матеріалів на їх основі, що

забезпечує поліпшення властивостей дорожнього полотна в цілому, включаючи основний несучий шар. Значну роль у формуванні та поліпшенні якості дорожнього полотна відіграє потенційна активація різного виду. Розв'язання екологічних і економічних проблем України пов'язане із застосуванням відходів виробництв, у тому числі від виробництва сільськогосподарських добрив. У даній ситуації особливо важливу роль відіграє активація інертної складової відходів для забезпечення максимальної ступені їх утилізації та створення передумов для отримання якісного будівельного матеріалу [16–20]. Перспективним рішенням вдосконалення фізико-механічних властивостей композиційних в'язучих і сумішей на їх основі є різні види активації [17-19]. Механоактивація, сумісність з хімічною та іншими видами активації залишається одним з найбільш різноманітних і енергоефективних способів підвищення якості сумішей і матеріалів їх потенційних можливостей [13-15] також сприяє прискоренню процесів затвердіння, підвищенню ступеня гідратації в'язучого, поліпшенню основних властивостей матеріалів, які істотно змінюються в часі і просторі [1; 20]. Не менш важливим є використання тонкодисперсних армуючих волокон. Волокна істотно знижують можливі деформаційні процеси в матеріалах. Раніше традиційне будівництво автомобільних доріг в Україні базувалося на значних витратах енергії, матеріалів і часу. Вартість привезених матеріалів, зокрема, щебеню і кварцового піску, та їх транспортування істотно впливають на загальну вартість дорожнього полотна. Питання забезпечення галузі дорожно-будівельних матеріалів вирішуються шляхом використання кондиційних, вже перероблених матеріалів: місцевих ґрунтів для шарів дорожніх покриттів, композиційних в'язучих на основі техногенної сировини, зокрема, золошлаків, шлаків, гіпсового в'язучого з фосфогіпсів та інших відходів різних виробництв. Аналіз світового та вітчизняного досвіду дозволяє припустити, що оптимальним рішенням цієї

проблеми може бути використання фосфогіпсу, модифікованого поліфункціональними органічними добавками, армованих полідисперсними мінеральними наповнювачами і високою дисперсністю гіпсового в'язучого за рахунок ефективної обробки сировини з фосфогіпсу, яка забезпечується в процесі різного виду активацій

Результати досліджень. Гіпсове в'язуче з фосфогіпсу - це матеріал, для якого раціонально використовувати широкий спектр добавок, що надають йому спеціальні технологічні та експлуатаційні властивості. Використання органічних комплексних поліфункціональних і полідисперсних мінеральних добавок-наповнювачів різного призначення дозволяє забезпечити необхідні властивості основам дорожнього полотна. У роботі проведено підбір складу сухої будівельної суміші (СБС) для основи доріг. Основа дороги спільно з покриттям перерозподіляє та знижує тиск на розташовані нижче додаткові шари земляного полотна. Основи повинні добре чинити опір розтягу при згині та мати необхідну міцність на стиск, бути монолітними й зсувостійкими. Важливими також є такі показники, як водопотреба, водостійкість, строки твердіння, міцність при стиску та згині. Проведено загальний аналіз впливу основних компонентів складу СБС на перелічені властивості. Дослідження властивостей проводилися із застосуванням математичного моделювання зі статистичною обробкою отриманих даних та аналізом нелінійного взаємовпливу компонентів сумішей між собою. За експериментальними даними було розроблено відповідні експериментально-статистичні (ЕС) моделі, за якими були побудовані однофакторні діаграми. Діаграми відображають нелінійний вплив варійованих факторів у зонах максимальних і мінімальних значень показників якості. Побудовані однофакторні діаграми описують зміну властивостей фосфогіпсового в'язучого під впливом карбоксилатної добавки, гідрофобізатора та дисперсних наповнювачів різного

призначення. Зокрема діаграми (рис. 1) описують вплив досліджуваних факторів на водопотребу.

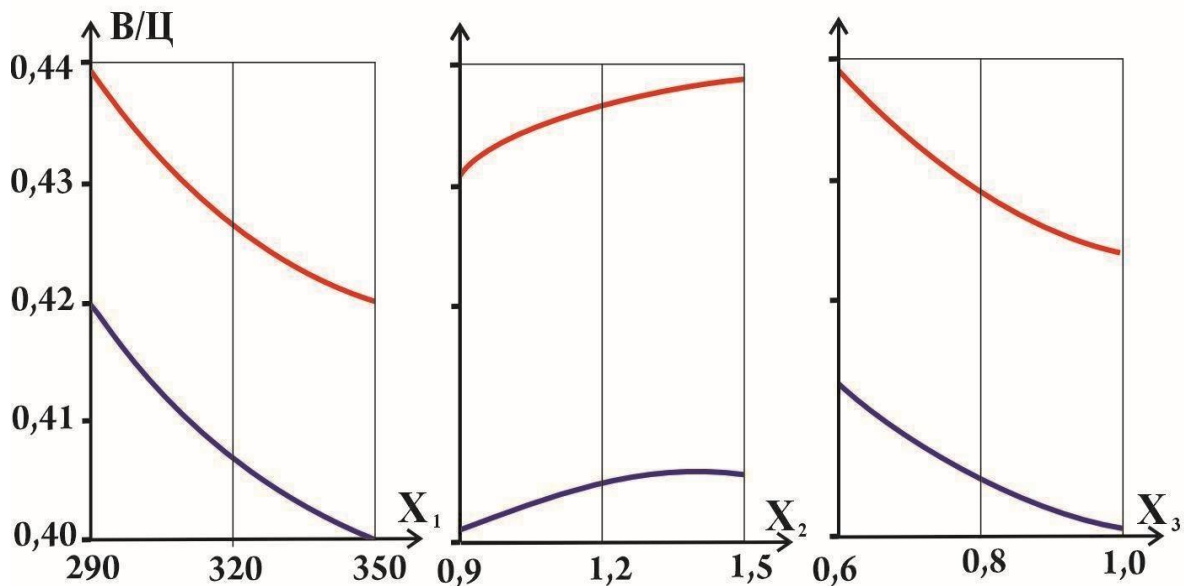


Рис. 1. Вплив варійованих факторів на В/Ц сумішей рівної рухомості в зонах мінімальних та максимальних значень

Аналіз рисунку 1 а, б показує, що всі варійовані фактори нелінійно впливають на В/Г відношення. Водопотреба будівельного гіпсу коливається в межах від 0,40 до 0,70. Застосування суперпластифікатора суттєво змінює водовміст, який може змінюватися від 0,85 до 0,50. Збільшення кількості суперпластифікатора Melflux 2651 F, який застосовується як розчинник і протиусадковий компонент для СБС, дозволяє знизити В/Г співвідношення з 0,80 до 0,50 при його вмісті (0,1–1,0 %) з покращенням технологічних властивостей фосфогіпсової суміші. При варіюванні кількості волластоніту в межах факторного простору експерименту показники В/Г сумішей змінюються значно менше – від 0,6 до 0,45 (максимум). Введення в суміш метакаоліну (МК) у кількості від 5 до 10 % від маси також знижує водовміст, а в інтервалі від 10 до 15 % метакаолін (МК) підвищує водопотребу фосфогіпсового в'язучого до 0,6–0,65. Волластоніт незначно впливає на водопотребу. За результатами експериментів встановлено, що застосування наповнювачів МК скорочує термін

тужавлення залежно від водогіпсового співвідношення. Термін початку тужавлення КФГВ знаходиться в межах: при вмісті Melflux 0,6 % - 10–25 хв., при вмісті Melflux 1,1 % - 30–35 хв.

Відповідно до ДСТУ для дорожніх не жорстких бетонів норми $F_{cm} = 7-9$ та $F_{ctsm} = 1.5-3.0$. Із діаграм на (рис. 2) (а, б) випливає, що максимальне значення міцності при стиску дорівнює 12–14 МПа. Такі показники досягаються при використанні суперпластифікатора Melflux 2651 F у кількості 0,6–0,7 %. На розтяг при згині максимальні значення підвищуються з 0,4 до 0,6 МПа при вмісті Melflux у кількості 0,60–0,70 %. Гідрофобізатор White нового покоління також позитивно впливає на показники F_{cm} та F_{ctsm} : показники якості збільшуються на 3,5–5 %. Слід зазначити, що міцність на розтяг при згині більшості складів перевищує вимоги у 1,2–1,8 рази. Армуючі волокна волластоніту також вводяться в суміш для поліпшення деформативних характеристик СБС на розтяг при згині та до 0,38 МПа тріщиностійкості.

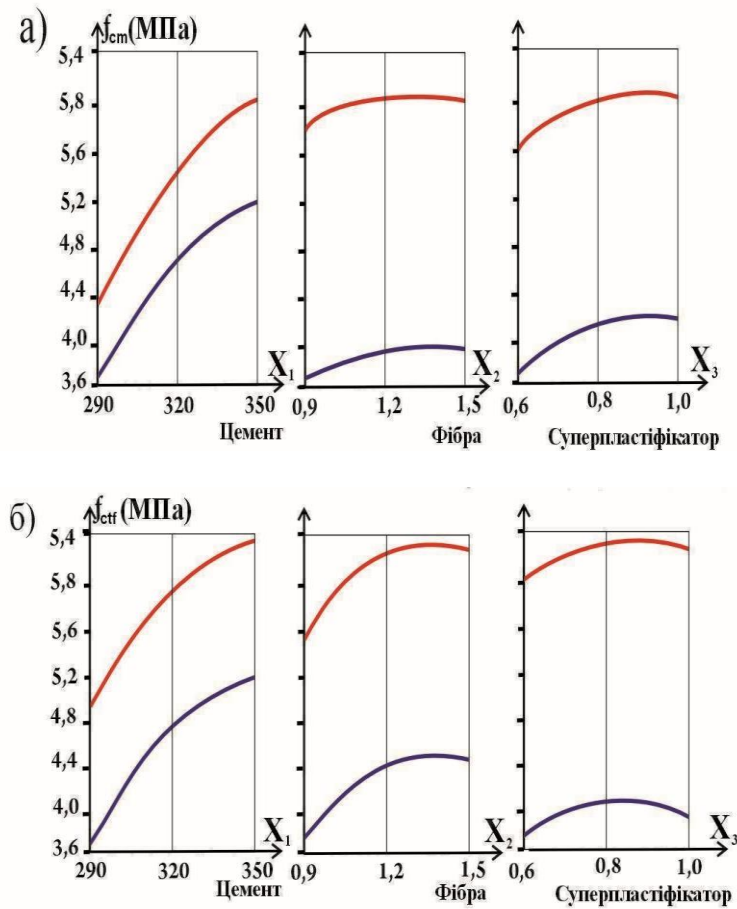


Рис. 2. Вплив варійованих факторів на міцність фібробетонів на стиск (а) і на розтяг при згині (б) в зонах мінімальних і максимальних значень

Визначення показників якості проводилося відповідно до ДСТУ Б В.2.7-42-97 «Методи визначення водопоглинання, щільності та морозостійкості будівельних матеріалів і виробів та ін.» [31]. Найбільші

значення F_{ctsm} отримані при вмісті гідрофобізатора White у кількості 2 %. Склади, які мають максимальну водостійкість, характеризуються коефіцієнтом $K_p = 0,80-0,85$ (рис. 3).

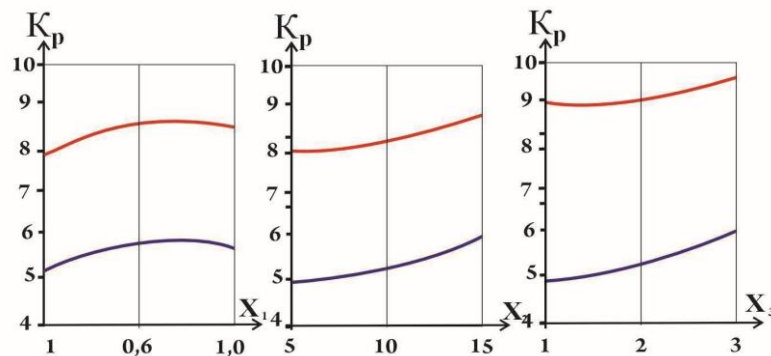


Рис. 3. Вплив варійованих факторів на водостійкість модифікованого фосфогіпсу в зонах максимуму та мінімуму

Та показниками $F_{ct} = 10-12,5$ МПа, $F_{ctm} = 4-6$ МПа, що відповідає стандартним вимогам. При цьому слід зазначити, що співвідношення компонентів та їх роль у формуванні структури і властивостей

змінюється, тому необхідні подальші експерименти та дослідження.

Висновки і перспектива подальших досліджень. Виконано аналіз технологій утилізації фосфогіпсу з переробленням його

в будівельний гіпс. Показано високу енергомісткість відомих технологій. Визначено проблеми, які необхідно вирішити для зниження подальшого забруднення навколишнього середовища в районах складування фосфогіпсових відходів. Утилізація відходів хімічного виробництва має важливе значення, оскільки розширює виробничу базу та здешевлює будівництво, а також позитивно впливає на охорону навколишнього природного середовища. Існуючі резерви техногенного фосфогіпсу, обсяг яких перевищує 60 тис. тон, дають можливість значно розширити сфери його використання. Установлено, що підвищення температури та тривалості помелу фосфогіпсу в імпрегнаційній камері скорочує тривалість обробки процесів: температуру – на порядок, а величина питомої поверхні фосфогіпсу при цьому збільшується у 2–2,5 рази. Міцність на стиск відповідає вимогам ДСТУ і становить від 7 до 9 МПа, а через 1,5 години складає 11–12 МПа. Термін тужавіння залежить від виду органічних і мінеральних добавок.

Початок тужавіння в'язучих, отриманих із фосфогіпсу з введенням комплексу органічних і мінеральних добавок, настає через 30–46 хвилин, а без добавок – через 15–18 хвилин. На істотне подовження строків тужавіння впливає карбоксилатна добавка Sika. Комплекс мінеральних добавок, зокрема армувальні волокнисті компоненти, сприяють підвищенню міцності при стиску та розтягу, зростанню тріщиностійкості й водостійкості матеріалу. При цьому збільшується середня густина (450 кг/м^3). Водопотреба зменшується з 0,55 до 0,45 внаслідок збільшення вмісту полікарбоксилатної добавки з 0,1 до 1,1 %. Найбільш перспективним напрямом підвищення екологічної безпеки та економічної доцільності перероблення фосфогіпсу у в'язуче є нейтралізація домішок у фосфогіпсі без додавання води. Цей процес реалізується у вигляді СБС. Дані щодо отримання гіпсових в'язучих зі свіжого та лежалого фосфогіпсу, на даний час в науковій літературі відсутні [13-18].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини : підруч. Київ : Основа, 2012. 448 с.
2. Пашенко О. О. В'язучі матеріали : підруч. Київ : Вища школа, 1995. 416 с.
3. Naoum M. C., Sapidis G. M., Papadopoulos N. A., Voutetaki M. E. An Electromechanical Impedance-Based Application of Realtime Monitoring for the Load-Induced Flexural Stress and Damage in Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2023. № 11 (4). P. 34.
4. Flores Nicolás A., Menchaca Campos E. C., Flores Nicolás M., Martínez González J. J., González Noriega O. A., Uruchurtu Chavarín J. Influence of Recycled High-Density Polyethylene Fibers on the Mechanical and Electrochemical Properties of Reinforced Concrete. *Fibers*. 2024. № 12 (3). P. 24.
5. Benzerara M., Biskri Y., Saidani M., Slimani F., Belouettar R. High-Temperature Behavior of Polyethylene-Terephthalate-Fiber-Reinforced Sand Concrete : Experimental Investigation. *Fibers*. 2023. № 11 (5). P. 46.
6. Geremew A., Outtier A., De Winne P., Demissie T. A., De Backer H. An Experimental Investigation on the Effect of Incorporating Natural Fibers on the Mechanical and Durability Properties of Concrete by Using Treated Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Application. *Fibers*. 2025. № 13 (3). P. 26.
7. Poudel S., Cibelli A., Del Prete C., Wan-Wendner R., Mazzotti C., Buratti N. Insights on Lattice Discrete Particle Model Calibration and Validation Procedure to Simulate Polypropylene and Steel Fibre-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2025. № 13 (2). P. 16.
8. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fischer H., Kondratieva N. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019. Vol. 13, № 4. Pp. 495–502.
9. Sanytsky M., Ushero-Marshak A., Kropyvnytska T., Heviuk I. Performance of multicomponent Portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite and limestone. *Cement Wapno Beton*. 2020. № 25 (5). Pp. 416–427.
10. Plank J. Concrete Admixtures Where Are We Now and What Can We Expect in the Future? 19'Ibaasil. Weimar. 2015. PV03. P. 18.
11. Roy D., Daimon M. Effect of Admixtures upon Electrokinetic phenomena during hydration of C_3S . C_3A and port-land cement. *Cements*. 1980. Vol. II. Pp. 242–246.
12. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б., Кочевих М. О., Хасан Є. Г., Константиновський Б. Я., Ракша В. О. Будівельне матеріалознавство : підруч.; за ред. П. В. Кривенко. Київ : Ліра-К, 2015. 624 с.

13. Пушкарьова К. К., Кочевих М. О. Матеріалознавство для архітекторів та дизайнерів : навч. посіб. Київ : Вид-во Ліра-К, 2019. 424 с.
14. Kondofesky-Mintova L., Plank J. *Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete : Proceedings Tenth International Conference* (October 2012, Prague, Czech Republic). P. 423.
15. Sanytskyi M. A., Kondratieva N. V. *Modern Trends in the Development and Production of Silicate Materials : III All-Ukrainian Science and Technology Conference* (September 5–8, 2016, Lviv). 2016. P. 93.
16. Фізика і хімія поверхності. Кн. 1. За ред. М. Т. Картеля та В. В. Лобанова. Київ : Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйко НАН України – Інтерсервіс, 2015. 1085 с.
17. Shishkin A., Shishkina A., Vatin N. Low-shrinkage alcohol cement concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 633–634. 2014. Pp. 917–921.
18. Shishkina A., Shishkin A. Study of the effect of micellar catalysis on the strength of alkaline reactive powder concrete. *EEJET*. 2018. № 3/6 (93). Pp. 46–51.

REFERENCES

1. Runova R.F., Dvorkin L.J., Dvorkin O.L. and Nosovs'kij Yu.L. *V'yazhuchi rehovini* [Binders]. Kyiv : Osnova Publ., 2012, 448 p. (in Ukrainian).
2. Pashchenko O.O. *V'yazhuchi materiali* [Binding materials]. Kyiv : Vishcha Shkola Publ., 1995, 416 p. (in Ukrainian).
3. Naoum M.C., Sapidis G.M., Papadopoulos N.A. and Voutetaki M.E. An Electromechanical Impedance-Based Application of Realtime Monitoring for the Load-Induced Flexural Stress and Damage in Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2023, no. 11 (4), p. 34.
4. Flores Nicolás A., Menchaca Campos E.C., Flores Nicolás M., Martínez González J.J., González Noriega O. A. and Uruchurtu Chavarín J. Influence of Recycled High-Density Polyethylene Fibers on the Mechanical and Electrochemical Properties of Reinforced Concrete. *Fibers*. 2024, no. 12 (3), p. 24.
5. Benzerara M., Biskri Y., Saidani M., Slimani F. and Belouettar R. High-Temperature Behavior of Polyethylene-Terephthalate-Fiber-Reinforced Sand Concrete : Experimental Investigation. *Fibers*. 2023, no. 11 (5), p. 46.
6. Geremew A., Outtier A., De Winne P., Demissie T.A. and De Backer H. An Experimental Investigation on the Effect of Incorporating Natural Fibers on the Mechanical and Durability Properties of Concrete by Using Treated Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Application. *Fibers*, 2025, no. 13 (3), p. 26.
7. Poudel S., Cibelli A., Del Prete C., Wan-Wendner R., Mazzotti C. and Buratti N. Insights on Lattice Discrete Particle Model Calibration and Validation Procedure to Simulate Polypropylene and Steel Fibre-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2025, no. 13 (2), p. 16.
8. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fischer H. and Kondratieva N. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019, vol. 13, no. 4, pp. 495–502.
9. Sanytsky M., Usherov-Marshak A., Kropyvnytska T. and Heviuk I. Performance of multicomponent Portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite and limestone. *Cement Wapno Beton*. 2020, no. 25 (5), pp. 416–427.
10. Plank J. Concrete Admixtures Where Are We Now and What Can We Expect in the Future? 19th Ibaasil. Weimar. 2015, PV03, p. 18.
11. Roy D. and Daimon M. Effect of Admixtures upon Electrokinetic phenomena during hydration of C₃S. C₃A and portland cement. *Cements*. 1980, vol. II, pp. 242–246.
12. Kryvenko P.V., Pushkariova K.K., Baranovskyi V.B., Kochevyh M.O., Hasan Ye.G., Konstantynivskyi B.Ya. and Raksha V.O. *Budivel'ne Materialoznavstvo : pidruchnik* [Materials Science in Construction : textbook]. Ed. by P.V. Kryvenko. Kyiv : Lira-K Publ., 2015, 624 p. (in Ukrainian).
13. Pushkariova K.K. and Kochevykh M.O. *Materialoznavstvo dlya Arhitektoriv ta Dizayneriv : navchal'nyy posibnyk* [Materials Science for Architects and Designers : textbook]. Kyiv : Lira-K Publ., 2018, 424 p. (in Ukrainian).
14. Kondofesky-Mintova L. and Plank J. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete : Proceedings Tenth International Conference. October 2012, Prague, Czech Republic, p.423.
15. Sanytskyi M.A. and Kondratieva N.V. Modern Trends in the Development and Production of Silicate Materials : III All-Ukrainian Science and Technology Conference. September 5–8, 2016, Lviv, p. 93.
16. *Fizika i Khimiya Poverkhnosti. Kniga I. Fizika Poverkhnosti* [Surface Physics and Chemistry. Book I. Surface Physics (Eds. M.T. Kartel and V.V. Lobanov)]. Kyiv : O.O. Chuiko Institute of Surface Chemistry of the N.A.S. of Ukraine-Interservis LLC, 2015, 1085 p. (in Ukrainian).
17. Shishkin A., Shishkina A. and Vatin N. Low-shrinkage alcohol cement concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 633–634, 2014, pp. 917–921.
18. Shishkina A. and Shishkin A. Study of the effect of micellar catalysis on the strength of alkaline reactive powder concrete. *EEJET*. 2018, no. 3/6 (93), pp. 46–51.

Надійшла до редакції: 15.02.2026.

УДК 002.1:027(091)+0.034.2

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.143.1235

MORPHOLOGY OF THE BOOK : EVOLUTION OF THE CODEX IN THE INFORMATION SOCIETY

PROKOFIEVA K.A.^{1*}, *Cand. Sc. (Philol.), Assoc. Prof.*,
RESHETILOVA O.M.², *Cand. Sc. (Ped.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Business Documentation Management and Information Activity, ERI “Dnipro Metallurgical Institute” of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Nauky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 760-79-90, e-mail: canopa@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4242-3346

² Department of Business Documentation Management and Information Activity, ERI “Dnipro Metallurgical Institute” of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Nauky Av., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 585-08-23, e-mail: karunga@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7975-0773

Abstract. *The purpose of the article* is to trace the evolution of the book-codex from antiquity to the present and to determine how the transformation of libraries in the digital age influences the preservation, study, and accessibility of this type of book form. The object of the study is the historical stages of the development of the codex and its role in the formation of library institutions, as well as contemporary digitization practices that provide new approaches to the preservation and representation of cultural heritage. To create a comprehensive picture of the development of the book-codex from antiquity to the digital age, analytical-synthetic, system-structural, comparative, and historical research methods were applied. *The results of the study* demonstrate a consistent pattern in the evolution of libraries: from the accumulation and preservation of knowledge to contemporary digital practices of access and information resource management. They show that the transformation of libraries – both as institutions and as part of the culture of reading – reflects broader cultural and technological shifts in society. Libraries have always been, and continue to be, key institutions for the preservation and transmission of knowledge, adapting to the challenges of their time. The analysis carried out makes it possible to outline the transition from traditional book forms to digital ones and confirms their ongoing ability to integrate innovations and ensure the continuity of cultural memory.

Keywords: *codex; scroll; library; transformation; history of the book*

МОРФОЛОГІЯ КНИГИ : ЕВОЛЮЦІЯ КОДЕКСУ В ІНФОРМАЦІЙНОМУ СУСПІЛЬСТВІ

ПРОКОФ'ЄВА К. А.^{1*}, *канд. філол. наук, доц.*,
РЕШЕТІЛОВА О. М.², *канд. пед. наук, доц.*

^{1*} Кафедра документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, пр. Науки, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 760-79-90, e-mail: canopa@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4242-3346

² Кафедра документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, пр. Науки, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 585-08-23, e-mail: karunga@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7975-0773

Анотація. *Мета статті* полягає у простеженні еволюції книги-кодексу від античності до сучасності та визначенні того, яким чином трансформація бібліотек у цифрову добу впливає на збереження, дослідження та доступність цього виду книжкової форми. Об'єктом дослідження є історичні етапи розвитку кодексу та його роль у становленні бібліотечних інституцій, а також сучасні практики цифровізації, які забезпечують нові підходи до збереження та репрезентації культурної спадщини. Для створення цілісної картини розвитку книги-кодексу від античності до цифрової доби використано аналітико-синтетичний, системно-структурний, порівняльний та історичний методи наукових досліджень. *Результати дослідження* свідчать про закономірність в еволюції бібліотек від накопичення та збереження знань до сучасних цифрових практик доступу та управління інформаційними ресурсами. Вони дають розуміння того, що трансформація бібліотек – як самих інституцій, так і культури читання загалом – є відображенням найбільш широких культурних і технологічних змін суспільства. Бібліотеки завжди були і залишаються ключовими інституціями збереження та передачі знань, адаптуючись до існуючих викликів часу. Проведений аналіз дозволив уявити картину переходу від традиційних книжкових форм до цифрових і засвідчив їхню перманентну здатність інтегрувати інновації та забезпечувати безперервність культурної пам'яті.

Ключові слова: кодекс; сувій; бібліотека; трансформація; історія книги

Introduction. In contemporary studies on the digital transformation of libraries, increasing attention is being paid to the change of physical information carriers. The evolution from scroll to codex, and later to the digital book, not only transformed the external form of the text but also prompted new approaches to the storage, organization, access, and dissemination of knowledge. Understanding the origins of the book form is key to a deeper comprehension of past and present library processes. It was, however, the emergence of the codex that became a fundamental milestone, enabling the formation of early libraries of a new type, including monastic and academic ones, as well as the creation of catalogs, bibliographic indexes, and other elements of library systematization. The development of the book-codex and the transformation of libraries over recent decades are considered in the context of digitization, new preservation technologies, and the rethinking of cultural heritage. Recent studies make it possible to observe not only the historical dimension of the codex as a book form but also the contemporary challenges faced by libraries.

The article “Multisensory Museums, Hybrid Realities, Narration and Technological Innovation” [2] describes the Codex4D project, aimed at the multidimensional digital reproduction of codices. The use of 3D and 4D technologies in museums and libraries demonstrates a new level of interactivity and authenticity, where the codex becomes not merely a text but an object of multisensory experience. This illustrates that modern libraries and heritage institutions are seeking new ways to make ancient books accessible to a broad audience while preserving their material value.

The work “Criteria for selecting documents for digitizing the historical and cultural heritage of Ukraine” [9] focuses on the digitization processes of documentary heritage in Ukrainian libraries. Although the emphasis is primarily on scientific literature and archival materials, the article addresses issues of access to early printed books and manuscripts, thereby encompassing the codex as a historical form. This study is important for understanding the regional

context: Eastern European libraries are actively participating in digital practices, integrating them into global research networks.

The study “Analysis of digital transformation of services in a research library” [1] published in *Digital Library Perspectives* outlines how libraries are restructuring their activities according to the digital needs of users. The authors examine the transformation of services, the shift from traditional service models to interactive and remote formats. While the study does not focus directly on codices, it demonstrates the general trend: the library ceases to be merely a repository and becomes a platform for accessing multi-format resources, including digital copies of codices.

The article “Digital Culture in Scientific Libraries” [4] emphasizes the cultural dimension of the digital library. It highlights that digitization not only changes the form of access to sources but also shapes new value orientations for librarians and users. Issues of preservation, long-term archiving, and reproduction of manuscripts are directly linked to the codex as a knowledge carrier, requiring specialized approaches to restoration and digital duplication.

A systematic review “Transformation of libraries during Covid-19 pandemic” [10] shows how the pandemic acted as a catalyst for accelerated digitization. The transition to remote access formats proved critical for maintaining library functions. In this context, codices and old books became a focal point: limited access to physical collections prompted more active digital scanning programs.

The article “Roles of Digital Technologies in Improving Library and Information Communication” [7] examines trends and challenges in the use of digital technologies in the library sector. The authors analyze not only infrastructure but also communication: how the nature of information interaction has changed. This is important for understanding that digitization is not merely a technical process but also a cultural transformation of libraries that work with materials from various historical periods, including codices.

The development of the book-codex is traced across different cultural and scientific

contexts, as reflected in contemporary research. The project “The Early History of the Codex: A New Methodology and Ethics for Manuscript Studies (EthiCodex)” [5] demonstrates that modern methodologies and digital tools allow not only the systematization of data on thousands of early codices but also the development of ethical approaches to their study, preservation, and promotion. This highlights the relevance of integrating historical and technological perspectives in the study of early manuscripts.

Gert Schubring’s article “Mathematics Textbooks: Transitions from Manuscript to Print” [8] illustrates the gradual nature of the transition from manuscript codices to printed books, especially in educational traditions. The analysis of mathematics textbooks shows that printed editions often reproduced elements of manuscripts, preserving their external appearance and structure. This emphasizes the continuity of cultural practices and the slow transformation of the codex under new conditions.

David S. Parker’s research on “History of Research on Codex Zacynthius” [6] reveals the material and textual features of this manuscript, including palimpsest characteristics and its use in liturgical practice. The study of the codex’s structure, content, and multi-layered functionality demonstrates its multifunctionality in religious and educational contexts, as well as its role in shaping monastic library collections.

Finally, the chapter “Libraries after 2020. An Introduction to Planning, Designing and Developing Library Buildings” in the collection *Better by Design* [3] examines the architectural and spatial dimension of libraries in the post-pandemic era. The authors note that modern libraries must consider the preservation needs of historical collections while simultaneously creating space for digital innovations. Codices, early printed books, and other unique editions appear not only as cultural artifacts but also as elements of an integrated information environment.

The analysis of literature on this topic allows the identification of the article’s aim: to trace the evolution of the book-codex from antiquity to the present and to determine how the

transformation of libraries in the digital age affects the preservation, study, and accessibility of this form of the book.

Methods. In accordance with the research objectives, the study employed analytical-synthetic, system-structural, comparative, and historical methods of scientific inquiry. Using this methodology, a systematic study was conducted, analyzing and highlighting the main processes in the development of the book-codex from antiquity to the digital age.

Results and Discussion. Thus, all analyzed and other sources focus on forming a comprehensive understanding of the transformation of libraries in the digital age. However, in this context, the codex appears primarily as a historical form of the book, as a symbol of the longevity of written culture, which requires new methods of preservation and presentation in the twenty-first century. Such an understanding does not fully reflect the entirety and significance of the codex as a form of information storage, which is one of the greatest cultural phenomena in human history.

The development of the book as a material carrier of knowledge has undergone a complex and lengthy path, from clay tablets and papyrus scrolls to modern digital formats (Fig. 1). One of the most significant stages of this evolution was the formation of the book-codex, which, in the first centuries CE, gradually replaced the scroll – the primary form of text recording up to that time – and became the main form of information fixation and preservation. This process was lengthy and consisted of several important stages, each of which played a role in establishing the codex as the dominant medium of writing.

The earliest prototypes of the codex appeared as early as the 1st century BCE within the Roman Empire. These were wooden or wax tablets connected together to form small booklets resembling the modern book form. Such tablets were mainly used for personal notes, short letters, or simple daily records. They did not yet contain literary or scientific works, but they initiated the very concept of a bound information carrier.

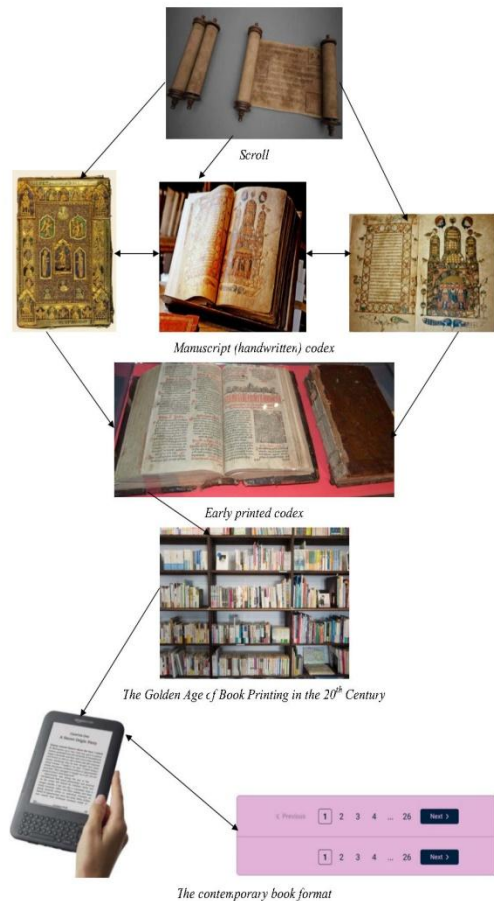


Fig. 1. The Evolution of the Book from Scroll to Digital Version

Later, in the 1st-2nd centuries CE, an important step toward improving the codex occurred with the use of parchment instead of papyrus. Parchment, made from specially treated animal skins, had several advantages: it was more durable, longer-lasting, and suitable for writing on both sides of a sheet. This allowed for more efficient use of material and the creation of more compact and voluminous books. Parchment pages were sewn into quires, and these in turn were bound into gatherings, which were increasingly resembling modern books.

Christianity played a significant role in popularizing the codex. From the 2nd century onward, Christian communities actively used codices for recording their sacred texts – Gospels, Epistles, Psalters, and other parts of the Bible. Unlike scrolls, codices were far more convenient for reading, study, and combining large volumes of text in a single volume. They offered several advantages: compactness, ease of information retrieval, and the possibility of

writing on both sides of the page. Therefore, they became the foundation for the dissemination of Christian manuscripts during late antiquity and the early medieval period. Thanks to the codex, monastic and university libraries acquired a new material basis for the preservation of knowledge, which influenced the further development of European culture. The codex enabled more compact and convenient storage of texts compared to scrolls, allowed for rapid location of required information due to its paginated structure, and created prerequisites for cataloging and systematization of knowledge. In monastic scriptoria, codices became the primary objects of copying, through which the ancient heritage was preserved and passed down to subsequent generations. University libraries, emerging in the twelfth and thirteenth centuries, were actively supplemented with codices on philosophy, law, medicine, and theology, making them accessible to students and faculty. Thus, the codex became not only the material foundation of library collections but also a tool for the intellectual integration of Europe, as knowledge spread between regions and academic centers. Its role in shaping cultural memory was so significant that the development of medieval educational and scientific traditions – which laid the groundwork for subsequent humanistic and scientific advances – cannot be imagined without the codex.

Christians sought to distinguish themselves from Jews and pagans, who traditionally used scrolls. Consequently, the codex began acquiring characteristics of religious identity. In the fourth century, when Christianity became the official religion of the Roman Empire, the codex was firmly established. A particularly important milestone was the commission by Emperor Constantine I the Great (272–337) for the production of fifty luxurious codices of the Holy Scriptures for churches in Constantinople. This was not only a stimulus for the spread of the codex in the ecclesiastical environment but also a signal for the gradual displacement of scrolls from use.

In the medieval period, the codex had already become the standard book form. Monasteries became the main centers of text copying, where codices were created manually,

adorned with miniatures, initials, and ornaments. They were carefully bound in leather or wooden covers, often inlaid with jewels, and became symbols of status and spiritual authority.

Subsequently, codices were used not only in the religious sphere but also in emerging universities and royal courts. They became important tools for systematizing knowledge and cultural heritage, extending far beyond liturgical needs. In medieval universities, codices contained educational materials, commentaries on classical texts, and treatises on philosophy and medicine, contributing to the formation of European intellectual traditions. At royal courts, they performed not only informational but also representational functions: chronicles immortalized dynastic histories, encyclopedias compiled knowledge about the world, and legal codices served as the basis for administrative and judicial governance. Thus, the codex gradually transformed into a universal knowledge carrier, combining educational, scientific, legal, and cultural functions.

During this time, additional reasons contributed to the codex's popularity. Primarily, codices were easy to carry, could be opened to any page, and allowed for annotations. Page numbering and chapter division also emerged, enabling faster access to specific information, which was important for scholars and theologians. Additionally, it became evident that the codex form allowed parchment to better withstand the test of time, being more resistant to moisture, mold, and mechanical damage than scrolls. At the same time, codices remained unique and labor-intensive to produce, limiting access to knowledge.

The invention of printing in the mid-fifteenth century, associated with the work of Johannes Gutenberg, initiated a new stage in the evolution of the codex. Previously, each codex was manually produced and existed only in limited copies; printing opened the possibility for mass dissemination of knowledge. This radically changed the social role of the book: it ceased to be an exclusive privilege of monasteries, universities, or courts and gradually became accessible to a wider readership.

Mass-produced codices facilitated not only faster dissemination of texts but also the standardization of knowledge and the unification of linguistic and orthographic norms. The role of libraries grew as repositories not of unique artifacts but of systematically organized collections of printed editions. Consequently, the codex was established as a universal book form, remaining suitable for both manuscript and printed culture, symbolizing the continuity of knowledge transmission.

Printed books inherited the external form of the manuscript codex but transformed the very nature of knowledge dissemination. Mass book production made them more accessible, accelerated the exchange of ideas, and contributed to increased literacy and the development of a new reading culture.

With the advancement of printing, the codex maintained its dominance as a form but changed its status: from a manuscript unique item to a reproduced object. At this time, libraries gradually evolved from closed repositories for the privileged to open cultural and educational institutions. The expansion of the book market, the emergence of university libraries, and the formation of national libraries marked a new stage in the social role of the book. The codex, in the form of the printed book, became not only a carrier of knowledge but also an instrument of social transformations – the Reformation, the Enlightenment, and revolutions in science and politics.

In the modern and contemporary periods, the codex retained its format but changed its material nature. From the nineteenth century, mass book production began using machine-made paper, new types of bindings, and fonts. The twentieth century brought industrialization, automation, and standardization to book production. Another transformation of libraries acquired new meaning: alongside printed codices, microfilms, electronic catalogs, and later digital copies emerged. In the twenty-first century, the codex transforms into a digital format, with digital books and online libraries appearing. Today, the codex exists not only as a physical artifact but also as a digital object. Thanks to information technologies, it can be digitized in high resolution, reproduced in 3D or

even 4D formats, allowing researchers and a wide audience to access the minutest details of its structure and material. Such digital copies not only ensure the preservation of unique artifacts from physical wear but also make them accessible to users worldwide, regardless of location.

Digitized codices are integrated into virtual libraries and museums, creating a global information space where cultural heritage becomes open and democratized. In the digital dimension, the codex transforms into a multidimensional object of study: it can be enlarged, rotated, examined for hidden layers, or reconstructed where fragments are missing. Thus, the codex acquires a new status – not merely as a historical artifact but as a dynamic information resource of the present, combining tradition and innovation.

The digital age has radically changed approaches to the preservation and popularization of codices. Previously, the primary task was the physical preservation of manuscripts and their limited use by researchers in specialized repositories. Today, digital technologies open new horizons for accessibility and study. Projects like Codex4D clearly demonstrate that modern tools of 3D visualization, scanning, and digital reconstruction allow scholars to literally “look beneath” the book cover, study internal structures, and even layers of material that have remained hidden for centuries. This creates new opportunities for all working with cultural heritage.

At the same time, the traditional paper form remains relevant. Firstly, it possesses unique cultural and historical value as the original information carrier. Secondly, the tactile interaction with authentic material provides a special emotional and intellectual experience that no digital copy can fully reproduce.

Such resilience of the codex demonstrates its uniqueness as a form of information organization, capable of adapting to changes in the technological environment. Over the centuries, the codex has remained the primary means of preserving and transmitting knowledge, withstanding the test of time and cultural transformations. Its structure,

combining user convenience, logical organization of material, and durability, has made the codex a universal information carrier, functioning effectively in manuscript, printed, and even digital cultures.

Modern innovations do not replace the book-codex but rather complement it, creating a new synergy between the traditional and the digital. Digitization, 3D and 4D visualizations, and interactive platforms open new opportunities for the study, preservation, and popularization of codices, providing wide access to previously restricted materials. Meanwhile, the authentic paper form retains its cultural, historical, and emotional value, as it serves as a tangible witness of the era and a carrier of unique authenticity.

This confirms that the codex has not only survived numerous cultural transformations but also has every chance to remain a significant element of the information space in the future. It becomes a symbol of cultural continuity, connecting the past, present, and future, while simultaneously serving as an object of interdisciplinary research, attracting the interest of philologists, historians, archivists, librarians, and information technology specialists. In this lies its exceptional role as a universal carrier of knowledge and cultural memory, capable of harmoniously integrating into the digital age.

Moreover, it should be emphasized that the electronic book, despite its digital nature, must retain the key features of the traditional book-codex, as these ensure the structured and recognizable nature of the edition. Primarily, this refers to pagination, which in the electronic format can be implemented not only as pages but also through navigation systems that simulate movement through a physical codex. Such pagination plays an important role in text orientation, making the electronic book convenient for learning, citation, and scholarly use.

Equally important is the preservation of the title page and the verso of the title, which serve as the electronic book’s “business card,” just as in the paper version. In digital form, the title page should include the work’s title, the author’s name, the publisher, and other elements identifying the edition and ensuring its

recognition among other electronic resources. The verso of the title traditionally contains information on copyright, year, and place of publication, which in the digital environment is necessary for legitimacy and correct bibliographic description.

Particular attention should be given to publication data, which, as in the printed codex, serve as the edition's "passport". For electronic publications, this may include ISBN/DOI, publisher details, year of creation or reissue, and distribution conditions (e.g., Creative Commons licenses). The presence of these features demonstrates the continuity of the electronic book with respect to the traditional codex while simultaneously integrating it into the modern library and information space.

Alongside the change in the primary information carrier, libraries are transforming into hybrid spaces: they simultaneously preserve authentic codices and provide access to their digital copies, which become objects of scholarly research and educational practices. Importantly, digitization has opened new horizons for accessibility. What was previously a privilege of a narrow circle of researchers is now available to a wide audience through online libraries and databases. At the same time, libraries face new challenges – long-term preservation of digital copies, ensuring authenticity, copyright protection, and balancing

physical and digital access. These new challenges also open up new development opportunities.

Conclusion

The trajectory of the codex from antiquity to the digital age simultaneously represents the history of libraries: from closed repositories and sacred centers to open cultural spaces and digital hubs. Thus, the codex not only established a new level of preservation and processing of textual information but also became the foundation for the entire subsequent evolution of libraries. Its emergence marks the first major stage in the transformation of libraries as institutions – from temple – and scroll-based collections of antiquity to the systematized repositories of knowledge in the Christian world. Today, when analyzing the digital transformation of libraries, we can observe analogous processes: changes in format, content, speed of access, and modes of interaction with texts, which again fundamentally influence the functions, role, and architecture of modern libraries. The codex as a form of the book has not disappeared; on the contrary, it has transformed, retaining its significance within new technological and cultural conditions. Today, it stands as a symbol of the continuity of knowledge and, at the same time, as a platform for innovation in librarianship.

REFERENCES

1. *Analysis of digital transformation of services in a research library* [Analiz tsyfrovoy transformatsii servisiv u naukovii bibliotetsi]. *Digital Library Perspectives* [Perspektyvy tsyfrovoy biblioteky]. 2024, vol. 40 (3), pp. 357–360. URL: <https://doi.org/10.1108/DLP-08-2024-149> (in Ukrainian).
2. Eva Pietroni. *Multisensory Museums, Hybrid Realities, Narration and Technological Innovation : A Discussion Around New Perspectives in Experience Design and Sense of Authenticity*. *Heritage*. 2025, vol. 8 (4). URL: <https://doi.org/10.3390/heritage8040130>
3. Khan A. and Thebridge S. *Libraries after 2020. An Introduction to Planning, Designing and Developing Library Buildings*. Cambridge University Press, 2022, pp. 3–12. URL: <https://doi.org/10.29085/9781783305728.004>
4. Lomachinska I., Lomachynskyi B. and Rykhlitska O. *Digital culture in scientific libraries* [Digital culture in scientific libraries]. *East* [East]. 2024, vol. 6 (1), pp. 43–49. URL: <https://doi.org/10.1108/DLP-09-2023-0045> (in Ukrainian).
5. Nongbri Brent (2021, project curator). *The Early History of the Codex : A New Methodology and Ethics for Manuscript Studies (EthiCodex)*. Project funded Research Council of Norway. URL: <https://mf.no/en/research/research-projects/early-history-codex>
6. Parker D. *History of Research on Codex Zacynthius. Codex Zacynthius: Catena, Palimpsest, Lectionary*. Gorgias Press, 2021. URL: <https://doi.org/10.31826/9781463241087-005>
7. Pluzhnyk O., Berezanska O. and Drok P. *Roles of digital technologies in improving library and information communication: Trends and challenges* [Rol tsyfrovoykh tekhnolohii u vdoskonalenni bibliotekno-informatsiinoi komunikatsii: tendentsii ta vyklyky]. *Society. Document. Communication* [Sotsium. Dokument. Komunikatsiia]. 2023, vol. 3, pp. 55–65. URL: <https://doi.org/10.69587/sdc/3.2023.55> (in Ukrainian).

8. Schubring Gert. Mathematics Textbooks: Transitions from Manuscript to Print. *ZDM – Mathematics Education*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s11858-025-01709-9>
9. Shevchenko M. *Criteria for selecting documents for digitizing the historical and cultural heritage of Ukraine* [Критерії відбору документів для оцифрування історико-культурної спадщини України]. *Bulletin of the Kharkiv State Academy of Culture* [Вісник Харківської державної академії культури]. 2019, vol. 54, pp. 73–81. URL: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.054.07> (in Ukrainian).
10. Transformation of libraries during Covid-19 pandemic : A systematic review. *Journal of Academic Librarianship*. 2022, vol. 48 (4), art. 102534. URL: <https://doi.org/10.1016/j.acalib.2022.102534>

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз цифрової трансформації сервісів у науковій бібліотеці. *Перспективи цифрової бібліотеки*. 2024. Вип. 40 (3). С. 357–360. URL: <https://doi.org/10.1108/DLP-08-2024-149>
2. Eva Pietroni. Multisensory Museums, Hybrid Realities, Narration and Technological Innovation : A Discussion Around New Perspectives in Experience Design and Sense of Authenticity. *Heritage*. 2025. Vol. 8 (4). URL: <https://doi.org/10.3390/heritage8040130>
3. Khan A., Thebridge S. Libraries after 2020. An Introduction to Planning, Designing and Developing Library Buildings. *Cambridge University Press*. 2022. Pp. 3–12. URL: <https://doi.org/10.29085/9781783305728.004>
4. Ломачинська І., Ломачинський Б., Рихліцька О. Цифрова культура у наукових бібліотеках. *Схід*. 2024. Вип. 6 (1). С. 43–49. URL: <https://doi.org/10.28925/2411-3093.2024.615>
5. Nongbri Brent. (2021, project curator). The Early History of the Codex : A New Methodology and Ethics for Manuscript Studies (EthiCodex). Project funded Research Council of Norway. URL: <https://mf.no/en/research/research-projects/early-history-codex>
6. Parker D. History of Research on Codex Zacynthius. *Codex Zacynthius : Catena, Palimpsest, Lectionary*. Gorgias Press. 2021. URL: <https://doi.org/10.31826/9781463241087-005>
7. Плужник О., Березанська О., Дрок П. Роль цифрових технологій у вдосконаленні бібліотечно-інформаційної комунікації : тенденції та виклики. *Соціум. Документ. Комунікація*. 2023. Вип. 3. С. 55–65. URL: <https://doi.org/10.69587/sdc/3.2023.55>
8. Schubring Gert. Mathematics Textbooks: Transitions from Manuscript to Print. *ZDM – Mathematics Education*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s11858-025-01709-9>
9. Шевченко М. Критерії відбору документів для оцифрування історико-культурної спадщини України. *Вісник Харківської державної академії культури*. 2019. Вип. 54. С. 73–81. URL: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.054.07>
10. Transformation of libraries during Covid-19 pandemic : A systematic review. *Journal of Academic Librarianship*. 2022. Vol. 48 (4). Art. 102534. URL: <https://doi.org/10.1016/j.acalib.2022.102534>

Надійшла до редакції: 12.02.2026.

УДК 699.841

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.151.1236

ОГЛЯД НЕОДНОРІДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТАМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОГО І СЕЙСМІЧНОГО ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

ДАНИШЕВСЬКИЙ В. В.¹, *докт. техн. наук., проф.*,
БЕЗВЕРХИЙ Д. С.^{2*}, *асп.*

¹ Кафедра будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів, 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, ORCID ID: 0000-0002-3049-4721

^{2*} Кафедра будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів, 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, ORCID ID: 0009-0001-0576-4152

Анотація. У статті висвітлено актуальну проблему сейсмічного захисту будівель і споруд, з особливим акцентом на застосування періодичних матеріалів для створення інноваційних систем сейсмоізоляції та віброзахисту. Зазначено, що традиційні методи сейсмоізоляції, зокрема гумометалеві опори та інші пружні вставки, мають низку недоліків: значні відносні переміщення під час сильних поштовхів, обмежену довговічність, а також недостатню ефективність у вертикальному напрямку, що є критичним для об'єктів підвищеної відповідальності, включно з конструкціями атомних електростанцій. У статті досліджуються можливості використання періодичних матеріалів і конструкцій, здатних формувати заборонені зони для сейсмічних хвиль певних частот, що дає змогу послаблювати або блокувати їхнє поширення в ґрунтовому масиві та фундаментній частині споруди. Особливу увагу приділено розробці, оптимізації та експериментальній верифікації одновимірних, двовимірних і тривимірних періодичних фундаментів, а також оцінюванню їхньої роботи в умовах різних типів збуджень. Розглянуто результати випробувань на вібростендах і в польових умовах, які підтверджують ефективність таких систем у зниженні динамічних навантажень, амплітуд коливань і передавання енергії на надземні конструкції. Показано, що застосування періодичних фундаментів може забезпечити стабільні демпфувальні властивості без складних механічних пристроїв і суттєво зменшити ризик накопичення пошкоджень у несучих елементах. **Мета статті** полягає у всебічному аналізі теоретичних, чисельних та експериментальних досліджень у галузі періодичних матеріалів для розробки систем сейсмоізоляції, що не потребують постійного обслуговування, мають підвищену надійність і мінімізують відносні переміщення. Зокрема, дослідження зосереджене на перевірці теорії, уточненні основних параметрів проектування таких систем та визначенні умов їхньої максимальної ефективності для реальних інженерних споруд. **Висновок.** Проаналізовано та підтверджено експериментально, що періодичні фундаменти є перспективним і ефективним способом зменшення пошкоджень конструкцій від сейсмічних збуджень. Результати досліджень можуть бути використані для розробки практичних рекомендацій, методик розрахунку та проектних настанов щодо впровадження цієї інноваційної технології в цивільному й промисловому будівництві.

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

REVIEW OF HETEROGENEOUS STRUCTURES AND METAMATERIALS FOR VIBRATION AND SEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

DANISHEVSKYY V.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BEZVERKHYY D.S.^{2*}, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Structural and Theoretical Mechanics and Strength of Materials, 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, ORCID ID: 0000-0002-3049-4721

^{2*} Department of Structural and Theoretical Mechanics and Strength of Materials, 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, ORCID ID: 0009-0001-0576-4152

Abstract. The article addresses the pressing issue of seismic protection of buildings and structures, with a particular emphasis on the use of periodic materials for the development of innovative seismic isolation and vibration mitigation systems. It is noted that traditional seismic isolation methods, including rubber – metal bearings and other resilient inserts, have several drawbacks: large relative displacements during strong ground motions, limited durability, and insufficient effectiveness in the vertical direction, which is critical for high-responsibility facilities, including nuclear power plant structures. The article explores the potential of periodic materials and structural configurations capable of creating band gaps for seismic waves within specific frequency ranges, thereby enabling the attenuation or blocking of their propagation through the soil mass and the foundation system. Special attention is devoted to the design, optimization, and experimental verification of one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional periodic foundations, as well as to assessing their performance under various excitation types. The results of vibration-table and field tests are presented, confirming the effectiveness of such systems in reducing dynamic loads, vibration amplitudes, and energy transmission to superstructures. It is shown that the use of periodic foundations can provide stable damping characteristics without complex mechanical devices and can significantly reduce the risk of cumulative damage in load-bearing elements. **The purpose of the article** is to provide a comprehensive analysis of theoretical, numerical, and experimental studies in the field of periodic materials aimed at developing seismic isolation systems that do not require continuous maintenance, offer enhanced reliability, and minimize relative displacements. In particular, the study focuses on validating the underlying theory, refining the key design parameters of such systems, and determining the conditions under which they achieve maximum effectiveness for real engineering structures. **Conclusion.** The analysis and experimental validation confirm that periodic foundations are a promising and efficient means of reducing structural damage caused by seismic excitations. The research findings can be used to develop practical recommendations, calculation methodologies, and design guidelines for implementing this innovative technology in civil and industrial construction.

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

Вступ. Сейсмічні явища залишаються одним із найбільш руйнівних природних катаклізмів, що становлять постійну загрозу для людських життів та інфраструктури. Традиційні підходи до сейсмостійкого проектування, що розвивалися протягом десятиліть, зосереджені переважно на підвищенні міцності, жорсткості та пластичності несучих конструкцій будівель. Мета такого підходу полягає в тому, щоб споруда могла витримати сейсмічні навантаження, деформуючись, але не руйнуючись, тим самим забезпечуючи безпеку людей. Проте навіть сучасні будівельні норми часто орієнтовані на принцип збереження життя, що допускає значні пошкодження конструкцій, які можуть зробити будівлю непридатною для подальшої експлуатації після землетрусу [1].

Значним кроком уперед стала концепція сейсмоізоляції основи, яка передбачає встановлення між фундаментом і надземною частиною будівлі спеціальних гнучких елементів, таких як еластомерні або фрикційні маятникові опори. Ці пристрої ефективно відокремлюють споруду від горизонтальних коливань ґрунту, значно зменшуючи сейсмічні сили, що діють на неї. Однак і цей метод має суттєві обмеження.

По-перше, він ефективний переважно проти горизонтальних коливань, тоді як вертикальна складова землетрусу передається на конструкцію майже без змін. По-друге, робота сейсмоізоляторів супроводжується великими відносними горизонтальними переміщеннями між будівлею та її основою, що вимагає влаштування спеціальних компенсаційних зазорів навколо споруди. Це ускладнює проектування і є неприйнятним для об'єктів із жорсткими інженерними комунікаціями, наприклад, для трубопровідних систем атомних електростанцій.

На основі цих обмежень останніми десятиліттями формується принципово нові методи сейсмічного захисту, що ґрунтуються на досягненнях фізики твердого тіла, зокрема на концепціях фононних кристалів та метаматеріалів [2; 3]. Ідея полягає в тому, щоб не просто пасивно протистояти сейсмічній енергії в межах конструкції, а активно керувати поширенням сейсмічних хвиль у ґрунтовому масиві, тобто фільтрувати, відхиляти або поглинати їх ще до того, як вони досягнуть фундаменту споруди. Цей підхід є прямим перенесенням ідей та математичного апарату, розроблених у нанофотоніці для керування світлом, в

область геофізики та будівельної інженерії для керування пружними хвилями [4; 5]. Математичні інструменти теорії перетворень, теорії ефективного середовища та теореми Флоке-Блоха, що дозволили створити пристрої для маніпуляції світлом на нанометровому рівні, тепер адаптуються для керування сейсмічними хвилями на макро масштабах [6]. Це відкриває шлях до створення сейсмічних метаматеріалів — штучно структурованих середовищ, здатних демонструвати безпрецедентний контроль над руйнівною енергією землетрусів.

Метою даної роботи є проведення систематичного та всебічного огляду наукових принципів, інженерних рішень та експериментально підтвердженої ефективності неоднорідних періодичних структур та метаматеріалів для сейсмічного захисту. Огляд має на меті винести ключові результати фундаментальних теоретичних робіт, чисельного моделювання та, що найважливіше, великомасштабних лабораторних і польових випробувань. Це дозволить сформулювати чітке уявлення про сучасний стан технології, її потенціал для вирішення практичних завдань сейсмозахисту та визначити основні невирішені проблеми та напрямки для подальших досліджень.

Метаматеріали та їх динамічні властивості. Перехід від теоретичних концепцій метаматеріалів до їх практичної реалізації для сейсмічного захисту пов'язаний із вирішенням низки фундаментальних наукових та інженерних проблем. По-перше, це проблема масштабування. Основні принципи фононних кристалів були розроблені для керування високочастотними акустичними (кГц-МГц) та тепловими (ТГц) коливаннями, де довжини хвиль є мікрометровими або нанометровими. Сейсмічні ж хвилі характеризуються наднизькими частотами (зазвичай в діапазоні 0,1–20 Гц) і, відповідно, великими довжинами хвиль, що можуть сягати десятків і сотень метрів [7; 8]. Пряме масштабування класичних фононних кристалів для таких довжин хвиль є неможливим, оскільки вимагало б створення

періодичних структур із розмірами елементів, сумісними з довжиною хвилі, що є економічно та технічно нереальним. По-друге, це проблема ефективності механізмів. Необхідно було знайти та інженерно реалізувати фізичні механізми, здатні ефективно взаємодіяти з низькочастотними хвилями. Це призвело до зміщення фокусу з механізму бреггівського розсіяння, ефективного для хвиль, довжина яких порівнянна з періодом структури, до механізму локального резонансу. Цей механізм дозволяє створювати заборонені зони на частотах, значно нижчих за бреггівські, що робить концепцію сейсмічних метаматеріалів практично здійсненою. По-третє, це проблема матеріалів та виготовлення. На відміну від лабораторних зразків, великомасштабні сейсмічні метаматеріали мають бути виготовлені з доступних, довговічних та економічно виправданих будівельних матеріалів, таких як бетон, гума, сталь та ґрунт [7–9]. Це вимагає розробки конструктивних рішень, які забезпечували б необхідні динамічні властивості (наприклад, великий контраст імпедансів) при використанні стандартних будівельних технологій. Нарешті, існує критичний розрив між теорією та реальністю. Теоретичні моделі та чисельне моделювання часто базуються на ідеалізованих припущеннях (наприклад, однорідність та лінійність властивостей ґрунту). Реальні ж геологічні умови характеризуються значною неоднорідністю, нелінійністю, наявністю затухання та складною взаємодією різних типів хвиль. Тому єдиним надійним способом підтвердження життєздатності концепції є проведення великомасштабних лабораторних та польових експериментів, які дозволяють перевірити теоретичні прогнози та оцінити реальну ефективність сейсмічних метаматеріалів [8; 10].

В основі функціонування сейсмічних метаматеріалів лежить їхня здатність створювати так звані заборонені зони – діапазони частот, у яких поширення пружних хвиль через періодичне середовище є неможливим. Хвилі, частота яких потрапляє

в таку зону, зазнають сильного відбиття або згасання. Існує два основні фізичні механізми для створення таких зон – бреггівське розсіювання та локальний резонанс.

Бреггівське розсіювання – механізм є аналогом дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці і базується на деструктивній інтерференції хвиль, розсіяних на періодично розташованих елементах структури. Ефект є найсильнішим, коли довжина хвилі приблизно вдвічі перевищує період структури. Хоча цей механізм є ефективним для високочастотних звукових хвиль, його застосування для сейсмозахисту є проблематичним. Наприклад, для поперечної хвилі з частотою 10 Гц, що поширюється в ґрунті зі швидкістю 200 м/с, довжина хвилі становить 20 м. Для її блокування за допомогою бреггівського розсіювання знадобилася б періодична структура з кроком близько 10 м. Створення таких масивних підземних споруд є надзвичайно дорогим і часто технічно неможливим, що робить цей механізм непрактичним для низькочастотного сейсмічного діапазону [2; 11].

Локальний резонанс – цей механізм став ключовим проривом, що зробив концепцію сейсмічних метаматеріалів життєздатною. Він не залежить від умови Бреґга і дозволяє створювати заборонені зони на частотах, значно нижчих за бреггівські, використовуючи елементи, розміри яких набагато менші за довжину хвилі [12–14]. Ідея полягає у введенні в основне середовище (матрицю) масиву локальних резонаторів [3]. Кожен резонатор, як правило, складається з важкого ядра, оточеного м'якою пружною оболонкою (наприклад, металевий сердечник у гумовій оболонці). Коли частота вхідної сейсмічної хвилі збігається з власною частотою коливань цих резонаторів, вони починають інтенсивно коливатися в протифазі до хвилі. Це призводить до того, що енергія хвилі «захоплюється» резонаторами і локально розсіюється, що ефективно блокує її подальше поширення. Саме субхвильова природа локального резонансу дозволяє

проектувати відносно компактні та практичні структури для керування довгохвильовими сейсмічними коливаннями [2; 15].

Розвиток теоретичної бази також не стояв на місці. Перші спроби описати ці явища за допомогою моделей градієнтної пружності зіткнулися з проблемою порушення принципу причинності – одного з фундаментальних законів фізики. Ці моделі, через свою математичну структуру, дозволяли існування так званих еванесцентних хвиль, які могли б миттєво переносити енергію, що суперечить реальності. Вирішенням стало створення фізично коректних, динамічно узгоджених моделей. У них було відновлено баланс між описом просторових і часових змін у системі. Включення до рівнянь вищих похідних не тільки за координатою, але й за часом, усунуло нефізичні ефекти і зробило моделі надійним інструментом для прогнозування реальних процесів [11; 15].

Одномірні періодичні фундаменти. Найпростішою реалізацією концепції сейсмічного метаматеріалу є одновимірний періодичний фундамент. Класичним прикладом такої системи є багатошарова конструкція, що складається з чергування жорстких та м'яких шарів, наприклад, бетону та гуми [16; 17]. У типових експериментальних дослідженнях використовуються шари бетону як жорстка і масивна складова та шари з м'якої гуми або поліуретану як податлива, пружна складова [3]. Шари надійно з'єднуються між собою, щоб забезпечити спільну роботу конструкції. Для аналізу поширення хвиль у такій нескінченній періодичній структурі застосовується теорема Флоке-Блоха [18]. Вона дозволяє звести задачу до аналізу однієї елементарної комірки (що складається з одного шару бетону та одного шару гуми) з періодичними граничними умовами. В результаті отримується дисперсійне співвідношення, яке пов'язує частоту хвилі з її хвильовим числом. Діапазони частот, для яких хвильове число стає комплексним, відповідають забороненим зонам, де хвилі експоненційно згасають. Аналіз показує, що

такі структури можуть створювати заборонені зони як для поперечних, так і для поздовжніх хвиль. Ефективність 1D-періодичних фундаментів була переконливо доведена під час випробувань на вібростенді. У цих експериментах порівнювалася динамічна реакція двох ідентичних моделей

будівель: одна на стандартному жорсткому фундаменті, інша — на періодичному багатопаровому фундаменті. Результати, узагальнені в таблиці 1, демонструють високу ефективність та частотну селективність системи [17].

Таблиця 1

Результати експериментальної валідації 1D-періодичних фундаментів на вібростенді

Тип збудження	Частота збудження, Гц	Тип хвилі	Результат (пікове прискорення/переміщення)	Зменшення вібрації, %
Навколишня вібрація	~50	Поперечна	Пікове прискорення зменшено з 0,046 g до 0,003 g	93,5
Сейсмічний запис (Oroville)	~18	Поперечна	Пікове горизонтальне прискорення зменшено на 50 %	50
Сейсмічний запис (Oroville)	~18	Поздовжня	Пікове вертикальне переміщення зменшено на 15,9 %	15,9
Гармонічне збудження	6–7	Поперечна	Незначне згасання або його відсутність	~0

Дані випробувань чітко показують, що коли частота збудження потрапляє в теоретично розраховану заборонену зону (як у випадках навколишньої вібрації та сейсмічного запису), періодичний фундамент значно знижує амплітуду коливань, що передаються на споруду. Водночас, для збуджень із частотами поза межами забороненої зони ефект згасання практично відсутній. Це підтверджує, що механізм працює саме як частотний фільтр, як і передбачає теорія. Важливо, що система показала ефективність не тільки проти горизонтальних, але й проти вертикальних коливань, що є суттєвою перевагою над традиційною сейсмоізоляцією.

Двовимірні метаматеріали для захисту від поверхневих та об'ємних хвиль. Двовимірні сейсмічні метаматеріали зазвичай реалізуються як планарні періодичні структури, сформовані в приповерхневому шарі ґрунту або у площині фундаменту. Їхня мета — керувати послаблювати насамперед поверхневі хвилі (передусім хвилі Релея, а в окремих конфігураціях також хвилі Лява), які переносять значну частину енергії та призводять до великих переміщень поблизу поверхні [9]. На відміну від одномірних

періодичних фундаментів, 2D-структури можуть забезпечувати «фільтрацію» коливань у площині в кількох напрямках розповсюдження та краще узгоджуються з реальним, неідеалізованим хвильовим полем [16; 19].

Типові 2D-конфігурації включають масиви свердловин, заглиблених або частково заглиблених стовпів, а також масиви локальних резонаторів у ґрунті чи на поверхні. Механізми утворення заборонених зон у таких системах, як правило, поєднують брегівське розсіювання в періодичному середовищі та локальний резонанс елементів комірки; у сучасних роботах активно досліджують «гібридні» смуги, які поєднують кілька проміжків і дають ширший робочий діапазон частот [16; 19].

Важливий сучасний напрям — 2D метаповерхні, у яких «тонкий» структурований шар (або поверхневий масив резонаторів) налаштовують на широкосмугове послаблення хвиль Релея в діапазоні, характерному для інженерно значущих збурень. Зокрема, запропоновано метаповерхню для широкосмугового згасання хвиль Релея приблизно у смузі 3,2–19,2 Гц із лабораторною експериментальною валідацією та ефектом

істотного зменшення поверхневих деформацій, що інтерпретується також як перетворення частини поверхневої енергії в об'ємні хвилі [5].

Практично важливим є врахування шаруватості ґрунтової основи. Для двошарових ґрунтів запропоновано комбіновану 2D-модель на принципі локального резонансу, де комірка містить частково заглиблений бетонний стовп і багат шарову композитну оболонку навколо підземної частини, а чисельний аналіз демонструє істотне послаблення хвилі Релея, а також ослаблення реального сейсмічного сигналу за рахунок правильної геометрії або градієнтного компонування [20].

Окремо варто виділити експериментальну перевірку 2D-підходів у реальному ґрунті. Класичні польові експерименти для 2D-періодичних фундаментів підтверджують наявність заборонених зон і зменшення реакції надфундаментної структури в цільових смугах частот [6]. Новіші польові дослідження «порожнинного» типу (масив квадратних отворів) демонструють, що навіть відносно проста 2D-геометрія може по-різному послаблювати хвилі Релея та Лява; при цьому автори окремо наголошують, що через неоднорідність ґрунтів та складність взаємодій польова валідація є принципово необхідною для коректного перенесення чисельних результатів у практику [21]. Такі висновки узгоджуються з сучасним трендом переходу від «чистої дисперсії» до комплексних метрик ефективності, що враховують реальну геологію, демпфування та нелінійність ґрунтового середовища [5; 22].

Метаміста та сейсмічне екранування. Досягнення в галузі сейсмічних метаматеріалів відкрили шлях до ще більш амбітних та інноваційних концепцій, які можуть докорінно змінити підходи до проектування сейсмостійких міст. Ця концепція пропонує розглядати цілий міський район або навіть місто не як набір окремих будівель, а як єдиний, великомасштабний метаматеріальний комплекс. У цій методології будівлі

перестають бути пасивними об'єктами, що зазнають впливу землетрусу, а стають активними елементами системи – «надземними резонаторами». Їхня колективна динамічна поведінка, власні резонансні частоти та взаємодія з ґрунтовою основою можуть суттєво змінювати локальне сейсмічне поле, посилюючи або, при правильному проектуванні, послаблюючи коливання [9; 21].

Для реалізації трансформаційної урбаністики ідеї «метаміста» пропонується використовувати математичний апарат теорії перетворень, запозичений з оптики. Цей підхід дозволяє розробляти такі схеми міського планування, в яких розташування вулиць, щільність та висотність забудови інженерно розраховані для того, щоб направляти сейсмічні хвилі за певними, безпечними траєкторіями, подібно до того, як лінза фокусує світло [22].

Сейсмічне екранування – найбільш вражаючим застосуванням цих ідей є створення сейсмічного плаща-невидимки – спеціально спроектованої зони з періодично розташованих структур (наприклад, будівель або підземних паль), яка змушує сейсмічні хвилі плавно огинати центральну, захищену область, залишаючи її практично незворушеною [9; 23; 24].

Було проведено моделювання для сейсмічного екрана діаметром 1 км. Результати показали, що така структура здатна ефективно відхилити поверхневі хвилі Релея з частотою 0,5 Гц [9; 23]. Це продемонструвало, що центральна зона екрана залишається захищеною від найбільш руйнівних зсувних компонент сейсмічної хвилі. Ці концепції знаменують собою еволюційний стрибок у сейсмозахисті: від захисту окремої будівлі (сейсмоізоляція), до екранування групи будівель (метабар'єри), і, нарешті, до перетворення самого міського середовища на інтегровану систему захисту. Це передбачає майбутню синергію між сейсмологією, матеріалознавством та міським плануванням, де генеральний план міста може стати його головним захисним механізмом.

Висновки

Аналіз сучасних досліджень однозначно свідчить, що неоднорідні періодичні конструкції та метаматеріали перетворилися з суто теоретичної концепції на експериментально підтверджену технологію з високим потенціалом для вібраційного та сейсмічного захисту. Експерименти, проведені як в лабораторних, так і в польових умовах, переконливо довели принципову можливість та високу ефективність керування сейсмічними хвилями за допомогою штучно створених структур.

Ключові кількісні результати підтверджують значний потенціал технології. Навіть прості одновимірні шаруваті системи здатні зменшити амплітуду сейсмічних коливань приблизно на 50 %. Більш складні двовимірні метаматеріали, що використовують механізм локального резонансу, демонструють виняткову ефективність, досягаючи згасання сейсмічних хвиль на понад 90 %. Це є прямим доказом того, що принцип субхвильової резонансної сейсмоізоляції є фізично обґрунтованим та технічно реалізованим [8]. Однак на шляху до широкого практичного впровадження цих технологій залишається низка викликів, які зміщують фокус із фундаментальної науки на інженерію та економіку:

- **Вартість та масштабованість:** виготовлення та встановлення масивних підземних періодичних структур є надзвичайно капіталомістким процесом.

Необхідна розробка економічно ефективних технологій масового виробництва та монтажу таких систем.

- **Довговічність та експлуатація:** забезпечення довготривалої стабільності характеристик заглиблених у ґрунт елементів, особливо м'яких компонентів (гуми, поліуретану), які можуть деградувати під впливом вологи, хімічних речовин та статичних навантажень, є критично важливим інженерним завданням.

- **Адаптація до локальних умов:** ефективність метаматеріалу сильно залежить від властивостей навколишнього ґрунту. Отже, не існує універсального рішення; кожна система має бути індивідуально розрахована та оптимізована під конкретні геологічні умови об'єкта та спектральні характеристики прогнозованих сейсмічних впливів [25].

- **Широкосмуговість:** хоча метаматеріали є дуже ефективними у своїх розрахункових заборонених зонах, реальні землетруси мають складний та непередбачуваний спектральний склад. Створення систем, здатних забезпечувати надійний захист у широкому діапазоні частот, залишається одним із ключових напрямків для подальших досліджень [12–14; 26].

Незважаючи на ці виклики, сейсмічні метаматеріали відкривають безпрецедентні можливості для захисту критичної інфраструктури та підвищення безпеки в сейсмічно активних регіонах світу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Makris N. Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2019. Vol. 48, № 2. Pp. 269–294. DOI: 10.1002/eqe.3124.
2. Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. Role of nanophotonics in the birth of seismic megastructures. *Nanophotonics*. 2019. Vol. 8, № 10. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0106.
3. Zhang X., Liu W., Shi Q. Field Experiments on a Square-Hole-Type Metamaterial : Exploring the Attenuation of Rayleigh and Love Waves. *Symmetry*. 2025. Vol. 17, № 3. Art. 339. DOI: 10.3390/sym17030339.
4. Brûlé S., Guenneau S. Past, present and future of seismic metamaterials: experiments on soil dynamics, cloaking, large scale analogue computer and space-time modulations. *Comptes Rendus. Physique*. 2020. Vol. 21 (7–8). Pp. 767–785. DOI: 10.5802/crphys.39.
5. Holliman Jr J. E., Schaefer H. T., McGrail B. P., Miller Q. R. S. Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research : design, phenomena, and applications. *Materials Advances*. 2022. Vol. 3. P. 8390–8406. DOI: 10.1039/D2MA00497F.
6. Yan Y., Laskar A., Cheng Z., Meng F., Tang Y., Mo Y. L., Shi Z. Seismic isolation of two dimensional periodic foundations. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 116, № 4. Art. 044908. DOI: 10.1063/1.4891837.

7. Aravantinos-Zafiris N., Sigalas M. M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 118, № 6. Art. 064901. DOI: 10.1063/1.4928405.
8. Mo Y. L., Yan Y., Menq F. Y., Stokoe K. H. II, Perkins J., Tang Y. Development of Seismic Isolation Systems Using Periodic Materials : Technical Report. Houston : University of Houston, 2014. DOE NEUP Project № 3219. OSTI ID: 1183763. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1183763>
9. Brûlé S., Ungureanu B., Achaoui Y., Diatta A., Aznavourian R., Antonakakis T., Craster R., Enoch S., Guenneau S. Metamaterial-like transformed urbanism. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2017. Vol. 2, № 1. Art. 20. DOI: 10.1007/s41062-017-0063-x.
10. Mu D., Shu H., Zhao L., An S. A Review of Research on Seismic Metamaterials. *Advanced Engineering Materials*. 2020. Vol. 22, № 4. e1901148. DOI: 10.1002/adem.201901148.
11. Askes H., Metrikine A. V. One-dimensional dynamically consistent gradient elasticity models derived from a discrete microstructure. Part 2: Static and dynamic response. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2002. Vol. 21 (4). Pp. 573–588.
12. Ding H., Huang N. And oth. Negative Poisson’s ratio locally resonant seismic metamaterials vibration isolation barrier. *Acta Mechanica Sinica*. 2024. Vol. 40. Art. 523370. DOI: 10.1007/s10409-024-23370-x.
13. Xu W., Sun H., Hai H., Wang W., Zhou C. Research on multi-oscillator locally resonant seismic metamaterials and the uniform and gradient design for broadband Rayleigh wave attenuation. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2025. Vol. 37. Art. 37. DOI: 10.1007/s00161-025-01368-x.
14. Li P., Yang F., Hou X., Li L., Wu J., Fan H. A radial seismic metamaterial filled with auxetic foam for filtering low-frequency Lamb waves and surface waves. *Acta Mechanica Sinica*. 2026. Vol. 42. Art. 424731. (Online: 27 May 2025). DOI: 10.1007/s10409-025-24731-x.
15. Metrikine A. V. On causality of the gradient elasticity models. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol. 297, № 3–5. Pp. 727–742. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.03.050.
16. 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.
17. Oz M. F., Kumbasaroglu H. M., Kumbasaroglu A. Experimental Investigation of Metamaterial-Inspired Periodic Foundation Systems with Embedded Piezoelectric Layers for Seismic Vibration Attenuation. *Buildings*. 2025. Vol. 15. Art. 4399. DOI: 10.3390/buildings15244399.
18. 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. Art. 112003. DOI: 10.1088/0964-1726/21/11/112003.
19. Kacin M. et al. Seismic metamaterials for low-frequency mechanical wave attenuation. *Natural Hazards*. 2021. Vol. 107. Pp. 213–229. DOI: 10.1007/s11069-021-04580-5.
20. 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. P. 2293. DOI: 10.1038/s41598-023-27678-1.
21. Chen Z. et al. Pine-like elastic metamaterials for urban seismic Rayleigh wave attenuation. *Urban Lifeline*. 2024. Vol. 2. Art. 1. DOI: 10.1007/s44285-024-00012-5.
22. Maldovan M. Sound and heat revolutions in phononics. *Nature*. 2013. Vol. 503, № 7475. Pp. 209–217. DOI: 10.1038/nature12608.
23. Liang X., Zhang F., Jiang J., Chen J. Rayleigh wave metasurface with the emerging hybrid band characteristics of Auxetic metamaterials. *Applied Physics A*. 2024. Vol. 130. Art. 524. DOI: 10.1007/s00339-024-07689-z.
24. Yang M., Zhang S., Ding Y., Fu Z. A combined seismic metamaterial in layered soils. *Applied Physics A*. 2024. Vol. 130. Art. 586. DOI: 10.1007/s00339-024-07748-5.
25. Liu H., Tian H., Tian Y., Du J., Chen G., Pei L. Radial Seismic Metamaterials Based on Layering Theory : Broadband Shielding of Ultra-Low Frequency Seismic Surface Waves. *Frontiers in Materials*. 2022. Vol. 9. Art. 908058. DOI: 10.3389/fmats.2022.908058.
26. Varma T. V., Chaunsali R., Khasgiwale S. The Influence of Clamping, Structure Geometry, and Material on Seismic Metamaterial Performance. *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 8. Art. 731433. DOI: 10.3389/fmats.2021.731433.

REFERENCES

1. Makris N. Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2019, vol. 48, no. 2, pp. 269–294. DOI: 10.1002/eqe.3124.
2. Brûlé S., Enoch S. and Guenneau S. Role of nanophotonics in the birth of seismic megastructures. *Nanophotonics*. 2019, vol. 8, no. 10. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0106.
3. Zhang X., Liu W. and Shi Q. Field Experiments on a Square-Hole-Type Metamaterial : Exploring the Attenuation of Rayleigh and Love Waves. *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 3, art. 339. DOI: 10.3390/sym17030339.
4. Brûlé S. and Guenneau S. Past, present and future of seismic metamaterials: experiments on soil dynamics,

cloaking, large scale analogue computer and space–time modulations. *Comptes Rendus. Physique*. 2020, vol. 21 (7–8), pp. 767–785. DOI: 10.5802/crphys.39.

5. Holliman Jr J.E., Schaef H.T., McGrail B.P. and Miller Q.R.S. Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research : design, phenomena, and applications. *Materials Advances*. 2022, vol. 3, pp. 8390–8406. DOI: 10.1039/D2MA00497F.

6. Yan Y., Laskar A., Cheng Z., Menq F., Tang Y., Mo Y. L. and Shi Z. Seismic isolation of two dimensional periodic foundations. *Journal of Applied Physics*. 2014, vol. 116, no. 4, art. 044908. DOI: 10.1063/1.4891837.

7. Aravantinos-Zafiris N. and Sigalas M.M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015, vol. 118, no. 6, art. 064901. DOI: 10.1063/1.4928405.

8. Mo Y.L., Yan Y., Menq F.Y., Stokoe K.H., Perkins J. and Tang Y. Development of Seismic Isolation Systems Using Periodic Materials : Technical Report. Houston : University of Houston, 2014, DOE NEUP Project No. 3219, OSTI ID: 1183763. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1183763>

9. Brûlé S., Ungureanu B., Achaoui Y., Diatta A., Aznavourian R., Antonakakis T., Craster R., Enoch S. and Guenneau S. Metamaterial-like transformed urbanism. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2017, vol. 2, no. 1, art. 20. DOI: 10.1007/s41062-017-0063-x.

10. Mu D., Shu H., Zhao L. and An S. A Review of Research on Seismic Metamaterials. *Advanced Engineering Materials*. 2020, vol. 22, no. 4, p. e1901148. DOI: 10.1002/adem.201901148.

11. Askes H. and Metrikine A.V. One-dimensional dynamically consistent gradient elasticity models derived from a discrete microstructure. Part 2: Static and dynamic response. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2002, no. 21 (4), pp. 573–588.

12. Ding H., Huang N. and oth. Negative Poisson’s ratio locally resonant seismic metamaterials vibration isolation barrier. *Acta Mechanica Sinica*. 2024, vol. 40, art. 523370. DOI: 10.1007/s10409-024-23370-x.

13. Xu W., Sun H., Hai H., Wang W. and Zhou C. Research on multi-oscillator locally resonant seismic metamaterials and the uniform and gradient design for broadband Rayleigh wave attenuation. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2025, vol. 37, art. 37. DOI: 10.1007/s00161-025-01368-x.

14. Li P., Yang F., Hou X., Li L., Wu J. and Fan H. A radial seismic metamaterial filled with auxetic foam for filtering low-frequency Lamb waves and surface waves. *Acta Mechanica Sinica*. 2026, vol. 42, art. 424731. (Online: 27 May 2025). DOI: 10.1007/s10409-025-24731-x.

15. Metrikine A.V. On causality of the gradient elasticity models. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, vol. 297, no. 3–5, pp. 727–742. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.03.050.

16. 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.

17. Oz M.F., Kumbasaroglu H.M. and Kumbasaroglu A. Experimental Investigation of Metamaterial-Inspired Periodic Foundation Systems with Embedded Piezoelectric Layers for Seismic Vibration Attenuation. *Buildings*. 2025, vol. 15, art. 4399. DOI: 10.3390/buildings15244399.

18. 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, art. 112003. DOI: 10.1088/0964-1726/21/11/112003.

19. Kacin M. et al. Seismic metamaterials for low-frequency mechanical wave attenuation. *Natural Hazards*. 2021, vol. 107, pp. 213–229. DOI: 10.1007/s11069-021-04580-5.

20. 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, p. 2293. DOI: 10.1038/s41598-023-27678-1.

21. Chen Z. et al. Pine-like elastic metamaterials for urban seismic Rayleigh wave attenuation. *Urban Lifeline*. 2024, vol. 2, art. 1. DOI: 10.1007/s44285-024-00012-5.

22. Maldovan M. Sound and heat revolutions in phononics. *Nature*. 2013, vol. 503, no. 7475, pp. 209–217. DOI: 10.1038/nature12608.

23. Liang X., Zhang F., Jiang J. and Chen J. Rayleigh wave metasurface with the emerging hybrid band characteristics of Auxetic metamaterials. *Applied Physics A*. 2024, vol. 130, art. 524. DOI: 10.1007/s00339-024-07689-z.

24. Yang M., Zhang S., Ding Y. and Fu Z. A combined seismic metamaterial in layered soils. *Applied Physics A*. 2024, vol. 130, art. 586. DOI: 10.1007/s00339-024-07748-5.

25. Liu H., Tian H., Tian Y., Du J., Chen G. and Pei L. Radial Seismic Metamaterials Based on Layering Theory : Broadband Shielding of Ultra-Low Frequency Seismic Surface Waves. *Frontiers in Materials*. 2022, vol. 9, art. 908058. DOI: 10.3389/fmats.2022.908058.

26. Varma T.V., Chaunsali R. and Khasgiwale S. The Influence of Clamping, Structure Geometry, and Material on Seismic Metamaterial Performance. *Frontiers in Materials*. 2021, vol. 8, art. 731433. DOI: 10.3389/fmats.2021.731433.

Надійшла до редакції: 29.01.2026.

УДК 699.841

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.160.1237

ДВОВИМІРНІ ҐРУНТОВІ МЕТАСТРУКТУРИ ТА ПЕРІОДИЧНІ ФУНДАМЕНТИ ДЛЯ ВІБРОСЕЙСМІЧНОГО ЗАХИСТУ: ОГЛЯД

КУЧИН І. О., асп.

Кафедра будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів, 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, ORCID ID: 0000-0001-6627-6315

Анотація. У статті висвітлено актуальну інженерну проблему зменшення низькочастотних коливань у системі «ґрунт – фундамент – споруда», спричинених сейсмічними явищами та техногенними джерелами, такими як транспорт і промислове обладнання. Зазначено, що традиційні методи віброзахисту, включно із сейсмоізоляційними опорами та ґрунтовими екранами, мають суттєві обмеження: недостатню ефективність у низькочастотному діапазоні через великі довжини хвиль, відсутність можливості точного спектрального налаштування та складність поєднання з несучими елементами будівель. У роботі досліджуються можливості двовимірних (2D) ґрунтових метаструктур і періодичних фундаментів, здатних формувати керовані зони загасання та смуги непропускання для пружних хвиль. Детально проаналізовано ключові фізичні механізми: розсіювання хвиль на періодичних неоднорідностях за бреггівським принципом, локальний резонанс субхвильових елементів, інерційне підсилення, а також ефекти перетворення поверхневих хвиль Релея в об'ємні моди. Систематизовано основні класи рішень, до яких належать ґрунтові метабар'єри, метаповерхні, періодичні пальові поля та метафундаменти. Розглянуто еволюцію методів моделювання від розрахунку дисперсійних діаграм для нескінченних середовищ до чисельного аналізу скінченних масивів із врахуванням дисипації енергії та динамічної взаємодії ґрунту і споруди. На основі огляду робіт 2020–2025 років показано, що для практичної реалізації критично важливим є розрізнення теоретичних заборонених зон та інженерних зон загасання, ефективність яких залежить від технологічних допусків і неоднорідності ґрунтового масиву. *Метою статті* є систематизація теоретичних та експериментальних даних для визначення меж застосування метаструктур і бар'єрів їх впровадження, а також обґрунтування переходу до методів проектування, що враховують невизначеність, зокрема, на базі теорії нечітких множин. **Висновок.** Підтверджено, що 2D-метаструктури є перспективним напрямом розвитку систем вібросейсмічного захисту, що дозволяє створювати компактні та ефективні бар'єри для низькочастотних впливів. Результати огляду формують основу для розробки нових методик розрахунку, орієнтованих на створення надійних конструктивних систем, характеристики яких залишаються стабільними в умовах реальної мінливості властивостей ґрунту.

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

TWO-DIMENSIONAL SOIL METASTRUCTURES AND PERIODIC FOUNDATIONS FOR VIBRO-SEISMIC PROTECTION : A REVIEW

KUCHYN I.O., *Postgrad. Stud.*

Department of Structural and Theoretical Mechanics and Strength of Materials, 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, ORCID ID: 0000-0001-6627-6315

Abstract. The article addresses the pressing engineering issue of mitigating low-frequency vibrations in the soil – foundation – structure system caused by seismic events and man-made sources such as transportation and industrial machinery. It is noted that traditional vibration protection methods, including seismic isolation bearings and soil barriers, face significant limitations: insufficient effectiveness in the low-frequency range due to large wavelengths, lack of precise spectral tunability, and difficulties in integration with load-bearing building elements. The article explores the potential of two-dimensional (2D) soil metastructures and periodic foundations capable of creating controlled attenuation zones and stop bands for elastic waves. Key physical mechanisms are analyzed in detail: Bragg scattering on periodic inhomogeneities, local

resonance of subwavelength elements, inertial amplification, and mode conversion effects of Rayleigh surface waves into bulk waves. The main classes of solutions are systematized, comprising soil metabarriers, metasurfaces, periodic pile fields, and metafoundations. The evolution of modeling methods is reviewed from dispersion diagram calculations for infinite media to numerical analysis of finite arrays considering energy dissipation and dynamic soil–structure interaction. Based on a review of studies from 2020–2025, it is shown that distinguishing between theoretical band gaps and engineering attenuation zones, whose effectiveness depends on construction tolerances and soil heterogeneity, is critical for practical implementation. **The purpose of the article** is to systematize theoretical and experimental findings to define the application limits and implementation barriers of metastructures, justifying the shift toward uncertainty-aware design methods, such as those based on fuzzy set theory. **Conclusion.** It is confirmed that 2D metastructures represent a promising direction in the development of vibro-seismic protection systems, enabling the creation of compact and effective barriers for low-frequency excitations. The review findings provide a basis for developing new calculation methodologies aimed at creating reliable structural systems capable of maintaining stable performance under the inherent variability of soil properties.

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

Вступ. Динамічні впливи на споруди та їхні основи формуються як природними, так і техногенними джерелами. Для інженерної практики особливо важливими є задачі, де коливання в ґрунті призводять до небажаних переміщень, прискорень або підвищених напружень у конструкціях: від сейсмічних навантажень до транспортно-індукованих вібрацій у щільній забудові. У низькочастотному діапазоні ефективно екранування або «фільтрація» хвиль традиційними бар'єрами часто ускладнені через великі довжини хвиль і залежність результату від параметрів ґрунту.

Поряд із класичними рішеннями (ізоляційно-демпфувальні пристрої у вузлі «споруда – фундамент» та геотехнічні екрани на шляху хвилі) останні два десятиліття активно розвивається хвильовий підхід: створення керованих структур у ґрунті або фундаменті, які змінюють дисперсію, модовий склад і загасання хвиль у цільових смугах частот. У науковій літературі такі конструкції часто відносять до «сейсмічних метаматеріалів»; у цьому огляді розгляд обмежено інженерно реалізованими 2D-рішеннями: періодичними фундаментами (періодичність у плані), ґрунтовими метабар'єрами та метаповерхнями.

Мета огляду – узагальнити результати ключових робіт щодо 2D періодичних фундаментів, метабар'єрів і метаповерхонь для послаблення сейсмічних коливань та

техногенних вібрацій, а також показати, як на практиці розрізняють «заборонені зони» (ідеалізована нескінченна періодика) і «зони загасання» (скінченні масиви з демпфуванням та взаємодією ґрунту та споруди). Додатково окреслено фактори, які визначають відтворюваність ефектів у реальних ґрунтових умовах, та наведено класифікацію підходів як артефакт систематизації.

Механізми хвильової фільтрації та терміни. Дисперсійні властивості періодичних пружних середовищ систематично вивчаються з початку 1990-х років. Для двовимірних періодичних систем показано, що контраст параметрів комірки може формувати розриви в дисперсійних діаграмах – частотні інтервали, у яких у межах ідеалізованої моделі нескінченної періодики відсутні поширювані моди (заборонені зони) [1; 2]. У таких постановках основний інструмент – умови Флоке–Блоха, які пов'язують поле переміщень у сусідніх комірках та дозволяють обчислювати спектр власних мод.

Обмеження бреггівського механізму стають очевидними при оцінці довжин хвиль. Для характерних швидкостей зсувних хвиль у ґрунтах $V_s \approx 200\text{--}400$ м/с бреггівський механізм формує перший заборонений інтервал порядку, коли крок періодичності адекватно оцінює оцінку $a \sim \lambda/2$; тут $\lambda = V_s/f$. Якщо для частоти 10 Гц цей розмір становить технологічно прийнятні 10–20 м, то для

захисту від низькочастотних сейсмічних коливань (близько 1 Гц) необхідний крок періодичності сягає 100–200 м. Це робить створення «чистих» фононних кристалів у натурних масштабах геометрично неможливим для інфраструктурних об'єктів.

Вихід запропонували локально-резонансні архітектури, у яких смуги непропускання визначаються резонансною динамікою включень і можуть реалізовуватися на субхвильових масштабах. Класичний приклад локально-резонансних акустичних метаматеріалів показав принципову можливість формувати заборонені смуги на частотах, істотно нижчих за брегітвські для тієї ж геометрії [3]. Подальші узагальнення механізмів метаматеріалів та фононіки сформувавши методичну базу для аналізу таких систем [4–6].

Для інженерного обговорення доцільно розрізняти дві постановки. Перша — «джерело – бар'єр – приймач», де метабар'єр або метаповерхня розміщуються на шляху хвилі й оцінюються за рівнем зниження коливань у контрольній зоні. Друга – «метафундамент», коли періодичність інтегрована у фундамент або палі та працює у тісному зв'язку з надбудовою; у цьому разі визначальною стає взаємодія ґрунту та споруди, а метрики ефективності переходять від чисто хвильових (передавання/ослаблення) до інженерних показників відгуку споруди.

Двовимірні ґрунтові метаструктури: метабар'єри та метаповерхні. У сейсмічному контексті розвиток напряму пов'язаний з переходом від суто теоретичних «фононних кристалів» до структурованих ґрунтових і фундаментних рішень. Експериментальні демонстрації зі структурованими ґрунтами підтвердили, що періодичні неоднорідності можуть змінювати поле поверхневих хвиль у реальних умовах [7; 8]. Паралельно запропоновано підходи, де ґрунтову метаструктуру інтерпретують через еквівалентні системи механічних осциляторів, що полегшує інженерний синтез комірок [9]. Оглядові праці узагальнюють типові

конфігурації, механізми та виклики перенесення концепції у практику [10–12]. Окремі дослідницькі роботи також деталізують чутливість ефектів до конструктивних умов, зокрема до закріплення, геометрії та матеріалу елементів метаструктури [13].

Ґрунтові метабар'єри розвиваються як хвильові фільтри, орієнтовані насамперед на хвилі Релея, амплітуди яких максимальні поблизу поверхні. Концепцію інженерного метабар'єра у вигляді масиву локально-резонансних елементів запропоновано як «щит» від поверхневих хвиль [14]; подальші роботи розглядають багатомасові резонаторні комірки та інші прийоми розширення робочих смуг [15; 16]. Узагальнювальна стаття про метабар'єри та метафундаменти підкреслює, що в реальних ґрунтах ефект визначається поєднанням періодичності, локального резонансу та демпфування, а також обмеженою кількістю елементів у масиві [17].

Тематично близькими є метаповерхні – періодичні масиви резонаторів на поверхні або в приповерхневій зоні, які взаємодіють із хвилями Релея та можуть змінювати модовий склад хвильового поля [18]. Окремий інтерес викликають підходи, що спрямовані на наднизькі частоти через спеціальні схеми закріплення резонаторів [19]. Як незалежний аргумент на користь ролі локального резонансу в приповерхневій зоні розглядають і природні аналогії, зокрема інтерпретацію лісових масивів як систем, здатних формувати резонансно зумовлені провали у спектрі поверхневих хвиль [20].

Для прикладних задач транспортно-індукованих вібрацій критичним є перехід від ідеалізованих джерел до моделей, які враховують взаємодію «потяг – колія – ґрунт». У такій постановці метабар'єр оцінюється за очікуваним зниженням коливань у контрольних точках і чутливістю до технологічних факторів. Прикладом є дослідження, де ефективність сейсмічного метабар'єра аналізується з урахуванням повної динамічної взаємодії системи [21]. Додатково

розглядаються економічні та екологічні аспекти, зокрема у термінах оцінювання життєвого циклу методів віброзахисту [22; 23].

Окремий приклад інженерної реалізації резонаторних включень у ґрунтовому середовищі наведено для масиву збірних сталевих секцій (експеримент і числове моделювання) [24].

Періодичні фундаменти та метафундаменти. У фундаментних системах періодичність може реалізовуватися як у вигляді шаруватих (переважно 1D) основ, так і у вигляді 2D періодики в плані. Шаруваті основи на основі періодичних матеріалів експериментально підтверджують можливість формувати смуги загасання та зменшувати передавання коливань у цільовому діапазоні [25]. Розвитком цієї ідеї є фундаменти з «ефективними зонами загасання», де підбір шарів або включень орієнтований на зниження передавання енергії коливань у заданій смузі частот [26].

Для двовимірних періодичних фундаментів показано, що періодичність у плані здатна формувати робочі інтервали зі зниженим передаванням коливань [27]. На відміну від ідеалізованих нескінченних моделей, у реальній конструкції ефект визначається скінченними розмірами фундаменту, межовими умовами та демпфуванням, що проявляється як зона загасання в скінченному масиві. Важливо також враховувати спільну роботу основи та надбудови: приєднання споруди може зміщувати робочі смуги, тому синтез комірки доцільно узгоджувати з динамікою «надбудова – фундамент». Це продемонстровано, зокрема, для періодичних фундаментів з інерційним підсиленням, де взаємодія «надбудова–фундамент» є ключовою для прогнозу ефективності [28].

Окремий напрям – інтеграція хвильового ефекту в несучі елементи фундаментів. Показано, що періодичні палі можуть поєднувати несучу функцію з керуванням поширенням хвиль і формувати зони загасання для поверхневих хвиль [29]. Подальший

розвиток приводить до концепції періодичних фундаментів і метафундаментів, де динамічний відгук споруди визначається спільною роботою основи та надбудови; тому ефективність оцінюють у межах узгоджених моделей [30; 31]. Новіші праці також поєднують чисельне моделювання та експеримент для частково заглиблених резонаторних систем і метафундаментів [32; 33].

Моделювання, масштабування та практичні обмеження. У контексті математичного моделювання поряд із прямим описом комірок застосовують узагальнені континуальні моделі, які прагнуть відтворювати дисперсійні ефекти мікроструктурованих середовищ без явного моделювання кожної неоднорідності. Зокрема, у динаміці градієнтних моделей важливо забезпечити причинність і динамічну узгодженість формулювань; ці питання обговорюються в роботах, де градієнтну пружність виводять із дискретної мікроструктури та аналізують її каузальні властивості [34–36]. Для задач ґрунтових метаструктур такі підходи можуть бути корисними як інструмент узагальнення та ідентифікації ефективних параметрів за експериментальними даними.

Практичне впровадження метаструктурних рішень потребує врахування невизначеності параметрів ґрунту та конструкції. Модулі деформації, щільність, коефіцієнти затухання, контактні умови та геометричні допуски можуть зміщувати робочі смуги і змінювати рівні коливань. Окрім класичних стохастичних підходів доцільними є методи формалізації неповної інформації. Зокрема, апарат нечітких множин застосовується в задачах механіки та оптимального проєктування за умов нечітких або інтервальних вихідних даних [37]. У контексті періодичних фундаментів та метабар'єрів це природно пов'язується з побудовою стійких до невизначеностей схем налаштування резонаторів і вибору геометричних параметрів.

Таблиця 1

Узагальнювальна класифікація 2D рішень для зменшення коливань у пов'язаній системі основи та споруди

Тип рішення	Домінуючий фізичний механізм	Об'єкт керування (Тип хвиль)	Критичні фактори реалізації та моделювання
2D Періодичний фундамент	Бреггівське розсіювання на ґратці включень; локальний резонанс (за наявності резонаторів)	Об'ємні та поверхневі хвилі, що передаються на надбудову	Динамічна взаємодія «ґрунт – фундамент – споруда»; зсув частот під навантаженням; межові ефекти скінченного масиву
Ґрунтовий метабар'єр	Локальний резонанс (субхвильове поглинання); інерційне підсилення	Переважно хвилі Релея у приповерхневій зоні	Глибина бар'єра відносно довжини хвилі; демпфування ґрунту; технологічна складність влаштування резонаторів
Метаповерхня	Модова взаємодія та конверсія поверхневих хвиль в об'ємні моди	Хвилі Релея (трансформація моди та відведення енергії в глибину)	Налаштування резонансної частоти; контактні умови на поверхні; стабільність властивостей приповерхневого шару
Періодичні пальові поля	Розсіювання на жорстких включеннях; взаємодія в системі «палія–ґрунт–палія»	Сейсмічні хвилі широкого спектра; техногенні вібрації	Подвійна функція (несуча здатність та віброзахист); необхідність розрахунку за граничними станами
Шарувата періодична основа	Одновимірна (1D) спектральна фільтрація в неоднорідному середовищі	Вертикальна компонента хвиль (стиск/зсув)	Вузкосмуговість; залежність ефективності від кута падіння хвилі; технологічна простота реалізації

Висновки

Двовимірні періодичні фундаменти, ґрунтові метабар'єри та метаповерхні є перспективними засобами зменшення низькочастотних коливань у пов'язаній системі основи та споруди. Їхня робота спирається на дисперсійні ефекти періодичних середовищ і локально-резонансні механізми, що дозволяє формувати цільові смуги непропускання або зони загасання.

Огляд літератури показує, що інженерна ефективність визначається не лише наявністю розрахункової «забороненої зони», а й демпфуванням, скінченними розмірами масивів, контрастом параметрів

комірки та реалістичними граничними умовами. Тому для проектування потрібні моделі спільної роботи основи й надбудови та, за можливості, експериментальна верифікація.

Подальший розвиток напрямку пов'язаний із розширенням робочих смуг за рахунок багаторезонаторних і частково заглиблених систем, інтеграцією хвильового ефекту в несучі фундаменти та палі, а також із переходом до стійкого до невизначеностей проектування. Для практичного застосування у проєктах підсилення та модернізації інфраструктури особливо важливо формувати прозорі критерії ефективності, узгоджені з інженерними метриками коливань і надійності споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sigalas M. M., Economou E. N. Band structure of elastic waves in two-dimensional systems. *Solid State Communications*. 1993. Vol. 86 (3). Pp. 141–143. DOI: 10.1016/0038-1098(93)90888-T.
2. Kushwaha M. S., Halevi P., Dobrzynski L., Djafari-Rouhani B. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*. 1993. Vol. 71 (13). Pp. 2022–2025. DOI: 10.1103/PhysRevLett.71.2022.
3. Liu Z., Zhang X., Mao Y. et al. Locally resonant sonic materials. *Science*. 2000. Vol. 289 (5485). Pp. 1734–1736. DOI: 10.1126/science.289.5485.1734.
4. Kadic M., Bückmann T., Schittny R., Wegener M. Metamaterials beyond electromagnetism. *Reports on Progress in Physics*. 2013. Vol. 76. P. 126501. DOI: 10.1088/0034-4885/76/12/126501.
5. Maldovan M. Sound and heat revolutions in phononics. *Nature*. 2013. Vol. 503. Pp. 209–217. DOI: 10.1038/nature12608.
6. Hussein M. I., Leamy M. J., Ruzzene M. Dynamics of Phononic Materials and Structures : Historical Origins, Recent Progress, and Future Outlook. *Applied Mechanics Reviews*. 2014. Vol. 66. P. 040802. DOI: 10.1115/1.4026911.
7. Brûlé S., Javelaud E. H., Enoch S., Guenneau S. Experiments on Seismic Metamaterials : Molding Surface Waves. *Physical Review Letters*. 2014. Vol. 112. P. 133901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.133901.
8. Aravantinos-Zafiris N., Sigalas M. M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 118. P. 064901. DOI: 10.1063/1.4928405.
9. Finocchio G., Casablanca O., Ricciardi G. et al. Seismic metamaterials based on isochronous mechanical oscillators. *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104. P. 191903. DOI: 10.1063/1.4876961.
10. Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. Emergence of seismic metamaterials : Current state and future perspectives. *Physics Letters A*. 2020. Vol. 384. P. 126034. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.126034.
11. Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. Past and future of seismic metamaterials. *Comptes Rendus Physique*. 2020. Vol. 21 (10). Pp. 983–992. DOI: 10.5802/crphys.39.
12. Mu D., Shu H., Zhao L., An S. A Review of Research on Seismic Metamaterials. *Advanced Engineering Materials*. 2020. Vol. 22 (5). P. 1901148. DOI: 10.1002/adem.201901148.
13. Varma T. V., Ungureanu B., Sarkar S. et al. The Influence of Clamping, Structure Geometry, and Material on Seismic Metamaterial Performance. *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 8. P. 603820. DOI: 10.3389/fmats.2021.603820.
14. Palermo A., Krödel S., Marzani A., Daraio C. Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 39356. DOI: 10.1038/srep39356.
15. Palermo A., Vitali M., Marzani A. Metabarriers with multi-mass locally resonating units for broad band Rayleigh waves attenuation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018. Vol. 113. Pp. 265–277. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.05.035.
16. Muhammad Lim C. W., Žur K. K. Wide Rayleigh waves bandgap engineered metabarriers for ground borne vibration attenuation. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 246. P. 113019. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113019.
17. Colombi A., Craster R. V., Colquitt D. et al. Metabarriers and metafoundations : A review of the results and current challenges. *Journal of Sound and Vibration*. 2020. Vol. 485. P. 115537. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115537.
18. Colquitt D. J., Colombi A., Craster R. V. et al. Seismic metasurfaces : Sub-wavelength resonators and Rayleigh wave interaction. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2017. Vol. 99. Pp. 379–393. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.12.004.
19. Achaoui Y., Antonakakis T., Brûlé S. et al. Clamped seismic metamaterials: ultra-low frequency stop bands. *New Journal of Physics*. 2017. Vol. 19. P. 063022. DOI: 10.1088/1367-2630/aa6e21.
20. Colombi A., Roux P., Guenneau S., Gueguen P. Forests as a natural seismic metamaterial : Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 19238. DOI: 10.1038/srep19238.
21. Li Y., Meng H., Zuo Y. et al. Seismic metamaterial barriers for ground vibration mitigation in railways considering the train – track – soil dynamic interactions. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 251. P. 119936. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119936.
22. Kaewunruen S., Martin V. Life cycle assessment of vibration mitigation methods in railway corridors. *Sustainability*. 2018. Vol. 10 (10). P. 3753. DOI: 10.3390/su10103753.
23. Kaewunruen S., Qin Y. Sustainability of vibration mitigation methods using meta-materials/structures along railway corridors exposed to adverse weather conditions. *Sustainability*. 2020. Vol. 12 (24). P. 10236. DOI: 10.3390/su122410236.
24. Muhammad Lim C. W., Reddy J. N. Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 188. Pp. 440–451. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.046.
25. Xiang H.-J., Shi Z.-F., Wang S.-Y., Mo Y.-L. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation. *Smart Materials and Structures*. 2012. Vol. 21. P. 112003. DOI: 10.1088/0964-1726/21/11/112003.
26. Shi Z.-F., Huang X., Chen J. 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.
27. Yan Y., Laskar A., Cheng Z. Seismic isolation of two-dimensional periodic foundations. *Journal of Applied*

Physics. 2014. Vol. 116. P. 044908. DOI: 10.1063/1.4891837.

28. Sun F., Dai X., Shi Z. Seismic mitigation performance of periodic foundations with inertial amplification mechanism considering superstructure – foundation interaction. *Smart Materials and Structures*. 2021. Vol. 30. P. 035012. DOI: 10.1088/1361-665X/abd58e.

29. Mandal P., Somala S. N. Periodic pile-soil system as a barrier for seismic surface waves. *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. P. 1184. DOI: 10.1007/s42452-020-2969-8.

30. Casablanca O., Garesci F., Azzerboni B. et al. Periodic foundation piles for the seismic protection of structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024. Vol. 182. P. 108742. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108742.

31. Sun Z., Zhao M., Gao Z. et al. Seismic mitigation performance of a periodic foundation for nuclear power structures considering soil – structure interactions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024. Vol. 184. P. 108814. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108814.

32. Wang G., Wang C., Liang C. et al. Subwavelength partial-embedded seismic metamaterial with wide working frequency : Numerical simulation and experiment. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 332. P. 120093. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120093.

33. Huang J.-K., Chen R., Zhang Z.-W. et al. Seismic metamaterials as foundations for buildings subjected to incident plane and bending waves : Simulation and experiment. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 343. P. 121187. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.121187.

34. Askes H., Metrikine A. V. One-dimensional dynamically consistent gradient elasticity models derived from a discrete microstructure. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2002. Vol. 21 (4). Pp. 573–588. DOI: 10.1016/S0997-7538(02)01217-2.

35. Metrikine A. V. On causality of the gradient elasticity models. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol. 297. Pp. 727–742. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.04.017.

36. Askes H., Aifantis E. C. Gradient elasticity in statics and dynamics : An overview of formulations, length scale identification procedures, finite element implementations and new results. *International Journal of Solids and Structures*. 2011. Vol. 48. Pp. 1962–1990. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2011.03.006.

37. Volchok D., Danishevskyy V., Slobodianiuk S., Kuchyn I. Fuzzy sets application in the problems of structural mechanics and optimal design. *Acta Mechanica*. 2023. Vol. 234. Pp. 6191–6204. DOI: 10.1007/s00707-023-03713-0.

REFERENCES

1. Sigalas M.M. and Economou E.N. Band structure of elastic waves in two-dimensional systems. *Solid State Communications*. 1993, vol. 86 (3), pp. 141–143. DOI: 10.1016/0038-1098(93)90888-T.

2. Kushwaha M.S., Halevi P., Dobrzynski L. and Djafari-Rouhani B. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*. 1993, vol. 71 (13), pp. 2022–2025. DOI: 10.1103/PhysRevLett.71.2022.

3. Liu Z., Zhang X., Mao Y. et al. Locally resonant sonic materials. *Science*. 2000, vol. 289 (5485), pp. 1734–1736. DOI: 10.1126/science.289.5485.1734.

4. Kadic M., Bückmann T., Schittny R. and Wegener M. Metamaterials beyond electromagnetism. *Reports on Progress in Physics*. 2013, vol. 76, p. 126501. DOI: 10.1088/0034-4885/76/12/126501.

5. Maldovan M. Sound and heat revolutions in phononics. *Nature*. 2013, vol. 503, pp. 209–217. DOI: 10.1038/nature12608.

6. Hussein M.I., Leamy M.J. and Ruzzene M. Dynamics of Phononic Materials and Structures : Historical Origins, Recent Progress, and Future Outlook. *Applied Mechanics Reviews*. 2014, vol. 66, p. 040802. DOI: 10.1115/1.4026911.

7. Brûlé S., Javelaud E.H., Enoch S. and Guenneau S. Experiments on Seismic Metamaterials : Molding Surface Waves. *Physical Review Letters*. 2014, vol. 112, p. 133901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.133901.

8. Aravantinos-Zafirios N. and Sigalas M.M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015, vol. 118, p. 064901. DOI: 10.1063/1.4928405.

9. Finocchio G., Casablanca O., Ricciardi G. et al. Seismic metamaterials based on isochronous mechanical oscillators. *Applied Physics Letters*. 2014, vol. 104, p. 191903. DOI: 10.1063/1.4876961.

10. Brûlé S., Enoch S. and Guenneau S. Emergence of seismic metamaterials : Current state and future perspectives. *Physics Letters A*. 2020, vol. 384, p. 126034. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.126034.

11. Brûlé S., Enoch S. and Guenneau S. Past and future of seismic metamaterials. *Comptes Rendus Physique*. 2020, vol. 21 (10), pp. 983–992. DOI: 10.5802/crphys.39.

12. Mu D., Shu H., Zhao L. and An S. A Review of Research on Seismic Metamaterials. *Advanced Engineering Materials*. 2020, vol. 22 (5), p. 1901148. DOI: 10.1002/adem.201901148.

13. Varma V., Ungureanu B., Sarkar A. et al. The Influence of Clamping, Structure Geometry, and Material on Seismic Metamaterial Performance. *Frontiers in Materials*. 2021, vol. 8, p. 603820. DOI: 10.3389/fmats.2021.603820.

14. Palermo A., Krödel S., Marzani A. and Daraio C. Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, p. 39356. DOI: 10.1038/srep39356.

15. Palermo A., Vitali M. and Marzani A. Metabarriers with multi-mass locally resonating units for broad band Rayleigh waves attenuation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018, vol. 113, pp. 265–277. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.05.035.

16. Muhammad Lim C.W. and Žur K.K. Wide Rayleigh waves bandgap engineered metabarriers for ground borne vibration attenuation. *Engineering Structures*. 2021, vol. 246, p. 113019. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113019.
17. Colombi A., Craster R.V., Colquitt D. et al. Metabarriers and metafoundations : A review of the results and current challenges. *Journal of Sound and Vibration*. 2020, vol. 485, p. 115537. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115537.
18. Colquitt D.J., Colombi A., Craster R.V. et al. Seismic metasurfaces : Sub-wavelength resonators and Rayleigh wave interaction. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2017, vol. 99, pp. 379–393. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.12.004.
19. Achaoui Y., Antonakakis T., Brûlé S. et al. Clamped seismic metamaterials: ultra-low frequency stop bands. *New Journal of Physics*. 2017, vol. 19, p. 063022. DOI: 10.1088/1367-2630/aa6e21.
20. Colombi A., Roux P., Guenneau S. and Gueguen P. Forests as a natural seismic metamaterial : Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, p. 19238. DOI: 10.1038/srep19238.
21. Li Y., Meng H., Zuo Y. et al. Seismic metamaterial barriers for ground vibration mitigation in railways considering the train – track – soil dynamic interactions. *Construction and Building Materials*. 2020, vol. 251, p. 119936. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119936.
22. Kaewunruen S. and Martin V. Life cycle assessment of vibration mitigation methods in railway corridors. *Sustainability*. 2018, vol. 10 (10), p. 3753. DOI: 10.3390/su10103753.
23. Kaewunruen S. and Qin Y. Sustainability of vibration mitigation methods using meta-materials/structures along railway corridors exposed to adverse weather conditions. *Sustainability*. 2020, vol. 12 (24), p. 10236. DOI: 10.3390/su122410236.
24. Muhammad, Lim C.W. and Reddy J.N. Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium. *Engineering Structures*. 2019, vol. 188, pp. 440–451. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.046.
25. Xiang H.-J., Shi Z.-F., Wang S.-Y. and Mo Y.-L. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations : experimental validation. *Smart Materials and Structures*. 2012, vol. 21, p. 112003. DOI: 10.1088/0964-1726/21/11/112003.
26. Shi Z.-F., Huang X. and Chen J. 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.
27. Yan Y., Laskar A. and Cheng Z. Seismic isolation of two-dimensional periodic foundations. *Journal of Applied Physics*. 2014, vol. 116, p. 044908. DOI: 10.1063/1.4891837.
28. Sun F., Dai X. and Shi Z. Seismic mitigation performance of periodic foundations with inertial amplification mechanism considering superstructure – foundation interaction. *Smart Materials and Structures*. 2021, vol. 30, p. 035012. DOI: 10.1088/1361-665X/abd58e.
29. Mandal P. and Somala S.N. Periodic pile-soil system as a barrier for seismic surface waves. *SN Applied Sciences*. 2020, vol. 2, p. 1184. DOI: 10.1007/s42452-020-2969-8.
30. Casablanca O., Garesci F., Azzeroni B. et al. Periodic foundation piles for the seismic protection of structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024, vol. 182, p. 108742. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108742.
31. Sun Z., Zhao M., Gao Z. et al. Seismic mitigation performance of a periodic foundation for nuclear power structures considering soil-structure interactions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024, vol. 184, p. 108814. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108814.
32. Wang G., Wang C., Liang C. et al. Subwavelength partial-embedded seismic metamaterial with wide working frequency : Numerical simulation and experiment. *Engineering Structures*. 2025, vol. 332, p. 120093. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120093.
33. Huang J.-K., Chen R., Zhang Z.-W. et al. Seismic metamaterials as foundations for buildings subjected to incident plane and bending waves : Simulation and experiment. *Engineering Structures*. 2025, vol. 343, p. 121187. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.121187.
34. Askes H. and Metrikine A.V. One-dimensional dynamically consistent gradient elasticity models derived from a discrete microstructure. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2002, vol. 21 (4), pp. 573–588. DOI: 10.1016/S0997-7538(02)01217-2.
35. Metrikine A.V. On causality of the gradient elasticity models. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, vol. 297, pp. 727–742. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.04.017.
36. Askes H. and Aifantis E.C. Gradient elasticity in statics and dynamics : An overview of formulations, length scale identification procedures, finite element implementations and new results. *International Journal of Solids and Structures*. 2011, vol. 48, pp. 1962–1990. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2011.03.006.
37. Volchok D., Danishevskyy V., Slobodianiuk S. and Kuchyn I. Fuzzy sets application in the problems of structural mechanics and optimal design. *Acta Mechanica*. 2023, vol. 234, pp. 6191–6204. DOI: 10.1007/s00707-023-03713-0.

Надійшла до редакції: 29.01.2026.

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

Підписано до друку 30.04.2026 р. Формат 60×84 1/8.

Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 10,44. Умовн. фарб.-відб. арк. 10,44.

Обл.-видавн. арк. 20,88. 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

Sent to press on 30 April 2026. Format 60×84 1/8.

Digital printing. Conventional quire 10,44. Conventional colour imprints 10,44.

Publisher's signatures 20,88. Number of copies 50. Order 218